

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Kolenc, M., 2016. Analiza hidravličnih razmer na odseku mestne Ljubljanice in Gruberjevega prekopa. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Rusjan, S., somentor Rak, G.): 73 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5822/>

Datum arhiviranja: 12-10-2016

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Kolenc, M., 2016. Analiza hidravličnih razmer na odseku mestne Ljubljanice in Gruberjevega prekopa. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Rusjan, S., co-supervisor Rak, G.): 73 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5822/>

Archiving Date: 12-10-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM VODARSTVO IN  
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

**MATJAŽ KOLENC**

**ANALIZA HIDRAVLIČNIH RAZMER NA ODSEKU  
MESTNE LJUBLJANICE IN GRUBERJEVEGA  
PREKOPA**

Diplomska naloga št.: 320/VKI

**HYDRAULIC ANALYSIS OF A REACH OF LJUBLJANA  
RIVER AND GRUBERJEV PREKOP**

Graduation thesis No.: 320/VKI

**Mentor:**

doc. dr. Simon Rusjan

**Somentor:**

viš. pred. mag. Gašper Rak

Ljubljana, 15. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**



## IZJAVA

Spodaj podpisani študent MATJAŽ KOLENC, vpisna številka 26106122, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: ANALIZA HIDRAVLIČNIH RAZMER NA ODSEKU MESTNE LJUBLJANICE IN GRUBERJEVEGA PREKOPA

## IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Novo mesto

Datum: 25.8.2016

Podpis študenta

---

## **BIBLIOGRAFSKO -DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

- UDK:** 556.166:502.51(282)(043.2)
- Avtor:** Matjaž Kolenc
- Mentor:** doc. dr. Simon Rusjan
- Somentor:** viš. pred. mag. Gašper Rak
- Naslov:** Analiza hidravličnih razmer na odseku mestne Ljubljane in Gruberjevega prekopa
- Tip dokumenta:** Diplomaska naloga – univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 73 str., 45 sl., 5 pregl., 10 diagr.
- Ključne besede:** Vegetacija, Manning, Mostni oporniki, HEC-RAS, preliv

### **Izveček**

Diplomska naloga analizira hidravlične razmere na reki Ljubljani in sicer na odseku mestne Ljubljane in na Gruberjevem prekoku. Predstavljen je pregled nad poplavno problematiko v povezavi z vplivom vegetacije, ki zavira pretok glede na svojo strukturo, velikost in samo količino. Še posebej veliko je vegetacije na Gruberjevem prekoku, kjer obrežna drevesa visijo v vodo. Nato je predstavljeno poglavje o gradbenih konstrukcijah ki so umetna ovira rekam, ki tako povzročajo zaježitve in poplave. To so mostovi in mostni oporniki, prelivi, jezovi, zapornice, pragovi,.. Predstavljen je tudi program Hec-ras, s katerim smo analizirali model reke Ljubljane, kot primer diplomske naloge. Na koncu so predstavljeni rezultati, njihova interpretacija in pa primerjava med povratnimi dobami odsekoma mestne Ljubljane in Gruberjevega prekopa.

## **BIBLIOGRAPHIC -DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDK:** 556.166:502.51(282)(043.2)

**Author:** Matjaž Kolenc

**Supervisor:** doc. Simon Rusjan, Ph.D.

**Co-Supervisor:** senior lecturer Gašper RAK

**Title:** Hydraulic analysis of a reach of Ljubljana river and Gruberjev prekop

**Document type:** Graduation Thesis – University studies

**Notes:** 73 p., 45 fig., 5 tab., 10 diagr.

**Keywords:** Vegetation, Manning, bridge piers, HEC-RAS, weir

### **Abstract**

My graduation thesis is about analysing hydraulic relationships of a reach of Ljubljana river and Gruberjev prekop. Chapter of flooding is presented. Then correlation with vegetation, which slows down the flow with its structure and shape is overviewed. Influence of vegetation in reach Gruberjev prekop is highlighted, where among other things, trees are hanging in the river. Next chapter is about construction structures that interfere with the flow. These are bridges and bridge piers, weirs, ...Program Hec-Ras, which is used as analytical model of reach of Ljubljana river is introduced. At the end, we overlook results and interpret the correlation of flow between mestna Ljubljana and Gruberjev prekop.

## ZAHVALA

Za pomoč in nasvete pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Simonu Rusjanu in viš. pred. mag. Gašperju Raku.



## KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Poplavna problematika.....	1
2	VEGETACIJA .....	5
2.1	Ekološka vloga obrežne vegetacije .....	5
2.2	Funkcije obrežne vegetacije .....	6
2.3	Vpliv vegetacije na hidravlične razmere v strugi .....	6
2.4	Upor vegetacije .....	7
2.5	Vertikalni profili pretoka.....	8
2.5.1	Pretok čez dobro potopljeno vegetacijo $h \gg 5 \cdot k$ .....	8
2.5.2	Pretok skozi in potopljeno vegetacijo $5 \cdot k > h > k$ .....	8
2.5.3	Pretok skozi potopljeno vegetacijo: $h < k$ .....	9
2.6	Togost in fleksibilnost rastlin .....	9
2.7	Listje in razvejanost .....	11
2.8	Manning .....	12
3	OBJEKTI NA VODI.....	16
3.1	Mostovi .....	16
3.2	Modeliranje toka vode skozi mostne odprtine s hidravličnim modelom Hec-Ras.....	18
3.3	Energijske izgube zaradi zoženja in razširitve .....	19
3.4	Hidravlični izračuni skozi most.....	19
3.4.1	Potopljena je samo zgornja stran mostu.....	20
3.4.2	Potopljeni sta obe strani mostu .....	21
3.4.3	Pretok čez most.....	21
3.5	Izbira pristopa modeliranja mostu.....	22
3.6	Mostni oporniki .....	23
3.6.1	D'Aubuisson.....	23
3.6.2	Nagler .....	24
3.6.3	Yarnell.....	26
3.7	Preliv .....	29
3.7.1	Krivočrtni preliv .....	30
3.7.2	Široki prag.....	32
3.7.3	Koeficient preliva.....	33
4	HEC-RAS.....	35
4.1	Koraki oblikovanja hidravličnega modela .....	37
5	UKREPI.....	40

6	LJUBLJANICA .....	42
6.1	Gruberjev kanal .....	43
6.2	Poplave septembra 2010.....	46
6.3	Zapornice.....	47
6.4	Karloški most.....	48
7	HIDRAVLIČNA ANALIZA OBRAVNAVANEGA ODSEKA .....	50
7.1	Geometrija struge .....	50
7.2	Objekti .....	53
7.3	Hidrološki podatki .....	56
7.4	Umerjanje modela .....	57
7.5	Robni pogoji .....	57
7.6	Simulacija programa.....	58
7.7	Rezultati.....	58
7.7.1	Vzdolžni prerez .....	59
7.7.2	Pretočne hitrosti in strižne napetosti na odseku mestne Ljubljane .....	61
7.7.3	Pretočne hitrosti in strižne napetosti na odseku Gruberjevega prekopa .....	63
7.7.4	Pretočne hitrosti in njihova razporeditev po odseku Gruberjev prekop.....	65
7.7.5	Primerjava rezultatov .....	68
8	ZAKLJUČEK .....	70
9	VIRI.....	71

## KAZALO SLIK

Slika 1: Razmere v vodnem toku pri obtekanju mostnega opornika (Steiman, 2010) .....	3
Slika 2: Prečni profil rečnega koridorja in obrežja ( <a href="http://mtwatercourse.org/resources/page.php?pageID=36">http://mtwatercourse.org/resources/page.php?pageID=36</a> ) .....	5
Slika 3: Shema sestavljenosti upora pretoka (Galema, 2009) .....	7
Slika 4: Pretok čez dobro potopljeno vegetacijo (Galema, 2009).....	8
Slika 5: Pretok skozi in potopljeno vegetacijo (Galema, 2009).....	9
Slika 6: Pretok skozi potopljeno vegetacijo (Galema, 2009).....	9
Slika 7: Togost in fleksibilnost rastlin (Galema, 2009) .....	10
Slika 8: Usmerjenost vegetacije (Galema, 2009).....	11
Slika 9: Zaraslost brežin Gruberjevega prekopa na Cesti Hrdeckega ( <a href="http://www.google.com/maps">www.google.com/maps</a> )	14
Slika 10: Zvišanje vodne gladine zaradi ovire (E.W.Publications, 2011).....	16
Slika 11: Tlorisni pregled vodnega kanala in mostnih stebrov (US army corps of engineers, 2010) .....	18
Slika 12: Slika prečnih presekov (US army corps of engineers, 2010).....	19
Slika 13: Vzdolžni presek mostu ob potopljeni zgornji strani (US army corps of engineers, 2010) .....	20
Slika 14: Vzdolžni presek mostu, potopljeni obe strani mostu (US army corps of engineers, 2010) .....	21
Slika 15: Vzdolžni presek popolno potopljenega mostu (US army corps of engineers, 2010)...	22
Slika 16: (a) vzdolžni prerez in (b) tlorisni pogled (Hamill, 1999).....	23
Slika 17: Preliv čez prag.....	33
Slika 18: Glavno okno HEC-RAS (US army corps of engineers, 2010).....	38

Slika 19: Podatki o prečnih profilih (US army corps of engineers, 2010).....	38
Slika 20: Podatki stalnega toka in robnih pogojev (US army corps of engineers, 2010) .....	39
Slika 21: Podatki stalnega toka in robnih pogojev (US army corps of engineers, 2010) .....	39
Slika 22: Karta vodozbirnega območja Ljubljane ( <a href="http://ksh.fgg.uni-lj.si/">http://ksh.fgg.uni-lj.si/</a> ).....	42
Slika 23: Ljubljana leta 1857 ( <a href="http://mapire.eu/en/">http://mapire.eu/en/</a> ).....	43
Slika 24: Puščice označujejo nanos plavja v pontone in odlagališče plavin Malega Grabna ( <a href="http://www.google.com/maps">www.google.com/maps</a> ) .....	45
Slika 25: Na ljubljanski Špici odprtje novih pristanov v Gruberjevem kanalu ( <a href="http://www.zurnal24.si">www.zurnal24.si</a> )	45
Slika 26: Zapornice na Gruberjevem kanalu ( <a href="http://mapio.net/o/5785324/">http://mapio.net/o/5785324/</a> ).....	48
Slika 27: Stari Karlovški most ( <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karlov%C5%A1ki_most_stari_(4).JPG">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karlov%C5%A1ki_most_stari_(4).JPG</a> ).....	49
Slika 28: Obravnavan odsek ( <a href="http://www.google.com/maps">www.google.com/maps</a> ) .....	50
Slika 29: Primer prečnega prereza na odseku Barje, št. 5 .....	51
Slika 30: Primer prečnega prereza na odseku mestne Ljubljane, Tromostovje .....	51
Slika 31: Primer prečnega prereza na odseku Gruberjevega prekopa, Karlovški most.....	52
Slika 32: Primer prečnega prereza na odseku Moste.....	52
Slika 33: Čevljarski most ( <a href="https://sl.wikipedia.org/wiki">https://sl.wikipedia.org/wiki</a> ).....	53
Slika 34: Tromostovje ( <a href="https://sl.wikipedia.org">https://sl.wikipedia.org</a> ).....	54
Slika 35: Stari Karlovški most ( <a href="https://sl.wikipedia.org">https://sl.wikipedia.org</a> ) .....	54
Slika 36: Zapornica na Ambroževem trgu ( <a href="http://www.pictureslovenia.com">http://www.pictureslovenia.com</a> ).....	55
Slika 37: Zapornica na Gruberjevem prekoku ( <a href="http://mapio.net/o/5785324/">http://mapio.net/o/5785324/</a> ) .....	55
Slika 38: Razporeditev pretokov na obravnavanem odseku (Hec-Ras) .....	58
Slika 39: Vzdolžni prerez odseka mestna Ljubljana (Hec-Ras) .....	59

Slika 40: Vzdolžni prerez odseka Gruberjev pretok (Hec-Ras) .....	60
Slika 41: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 20 pred Karlovškim mostom (Hec-Ras) .....	65
Slika 42: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 17 pri Karlovškem mostu (Hec-Ras) .....	65
Slika 43: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 16 med zapornicami in Karlovškim mostom (Hec-Ras) .....	65
Slika 44: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 14 pred zapornico (Hec-Ras).....	65
Slika 45: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 8 (Hec-Ras) .....	68

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrednosti Manningov koeficientov hrapavosti (Yarnell, 1934) .....	13
Preglednica 2: Koeficienti, ki pripadajo obliki mostnih stebrov (E.W. Publications, (2011) .....	17
Preglednica 3: Tipi mostnega opornika in koeficienti oblike mostnih opornikov (Yarnell, 1934)	24
Preglednica 4: Povratne dobe (Agencija Republike Slovenije za okolje, 2013) .....	56
Preglednica 5: Vrednost Manningovega koeficienta na odsekih reke Ljubljane .....	57

## KAZALO DIAGRAMOV

Diagram 1: Vrednost korekcijskega faktorja $\beta$ , za pretok po mostnih opornikih (Hamill, 1999)	25
Diagram 2: Diagram odčitavanja razlike višine vode dolvodno in med mostnimi oporniki (Hamill, 1999) .....	27
Diagram 3: Diagram odčitavanja razlike višine vode dolvodno in med mostnimi oporniki pri deročem toku (Hamill, 1999).....	28
Diagram 4: Koeficient izliva za navpični preliv s praktično obliko.....	31
Diagram 5: Razmerje med koeficienti izpusta zaradi previsoke vode dolvodno .....	32
Diagram 6: Pretoki leta 2010 (Arso, 2011) .....	46
Diagram 7: Diagram pretočnih hitrosti na odseku mestne Ljubljane pri povratnih dobah 2, 10, 50, 100, 500, 1000 let (Hec-Ras) .....	61
Diagram 8: Diagram strižnih napetosti na odseku mestne Ljubljane pri povratnih dobah 2, 10, 50, 100, 500, 1000 let (Hec-Ras) .....	62
Diagram 9: Diagram pretočnih hitrosti na odseku Gruberjevega pretoka pri povratnih dobah 2, 10, 50, 100, 500, 1000 let (Hec-Ras) .....	63
Diagram 10: Diagram strižnih napetosti na odseku Gruberjevega prekopa pri povratnih dobah 2, 10, 50, 100, 500, 1000 let (Hec-Ras) .....	64

## **OKRAJŠAVE IN SIMBOLI**

**MOP** – Ministrstvo za okolje in prostor

**ARSO** – Agencija Republike Slovenije za okolje

**RS** – Republika Slovenija

**VGI** – Vodnogospodarski inštitut

**HEC – RAS** - Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

**MIO** - Milijon



## 1 UVOD

Poplave so naravni pojav, kjer voda prestopi bregove in poplavi okolico. So ene izmed naravnogeografskih preoblikovalcev pokrajine. Do poplav pride zaradi izredno močnih padavin, naglega taljenja snega ali medsebojnega skupnega delovanja, zajezenega odtoka na kraških poljih, zaradi zaježitev povzročenih s snežnim ali zemeljskim plazom, zaradi delovanja hudournikov, zaradi naravnega posedanja tal ipd.

Tako poplave delimo na hudourniške, katere se pojavljajo v gorskem in hribovitem svetu ter ob nekaterih večjih rekah. Za njih je značilno da hitro narastejo in prav tako upadejo. So kratke in intenzivne. Rečne nižinske nastanejo zaradi razlike v hitrosti dotekanja visokih vod ter pretočnih zmogljivosti rečnih strug. Kraške se pojavljajo v kraškem svetu, do njih pa pride, kadar je dotok na kraško polje večji kot podzemni odtok prek požiralnikov. Morske poplave nastanejo ob kombinaciji visoke plime, nizkega zračnega tlaka, ko se gladina morja za kratek čas dvigne nad višino običajne visoke plime in preplavi obrežje.

Po drugi strani so manjše poplave lahko tudi koristne v gospodarstvu, kjer se poveča rodovitnost tal in imajo pomembno vlogo pri ohranjanju določenih ekosistemov. Intenzivna gospodarska raba zahteva urejen vodotok, ki je ne bi ogrožal s poplavami. Ker pa popolne zaščite pred poplavami ni, si moramo kar najbolj prizadevati omejiti gospodarsko škodo in zavarovati ljudi.

### 1.1 Poplavna problematika

Skrozi stoletja so reke bile primorane predati veliko prostora. Zdaj so stisnjene med ozkimi rečnimi bregovi in nasipi. Nadaljnjo obzidovanje bregov bo privedla le še do večjega pretoka in do še hujših poplav dolvodno. Lahko bi zvišali nasipe, zgradili dodatne, postavili valolome, znižali rečno dno, odstranili razne ovire. Ker pa so taki ukrepi običajno dolgotrajni ali pa jih je težko umestiti v prostor, niso prava rešitev. Eden od ukrepov je, da se vodi dopusti razlivanje na poplavnih območjih.

Ko pride do poplav, se vodna gladina dvigne nad bregove in nato razlije po poplavnih območjih.

Ti so sestavni del vodotokov in kot del vodnega prostora, predstavljajo pomemben vodni ekosistem in pomembno vplivajo na vodni režim. So naravni nadzor poplav in erozije, vplivajo na vodno bilanco podtalnice, na kakovost voda, na rastlinski svet, na ribe in naravo, imajo pomen pri gojenju naravnih in kmetijskih površin, zagotavljajo možnost za rekreacijo in omogočajo znanstvene raziskave in izobraževanje na prostem.

Naravna poplavna območja so dragocen del narave, saj tu ni ranljivosti zaradi poplav. V sodobnih družbah so začeli izvajati projekte za revitalizacijo in opuščanje antropogenih rab prostora na poplavnih območjih. Težava leži tam, kjer tik ob vodi stojijo hiše ali druga infrastruktura.

Poleg razlivnih območij, kjer bi visokim vodam omogočali nadzorovano razlivanje in tako zmanjševali poplave kjer jih ne želimo, pa bi potrebovali še prostor kjer bi shranili vodo za sušna obdobja. To so razna jezera, akumulacije, zadrževalniki, premostitveni objekti

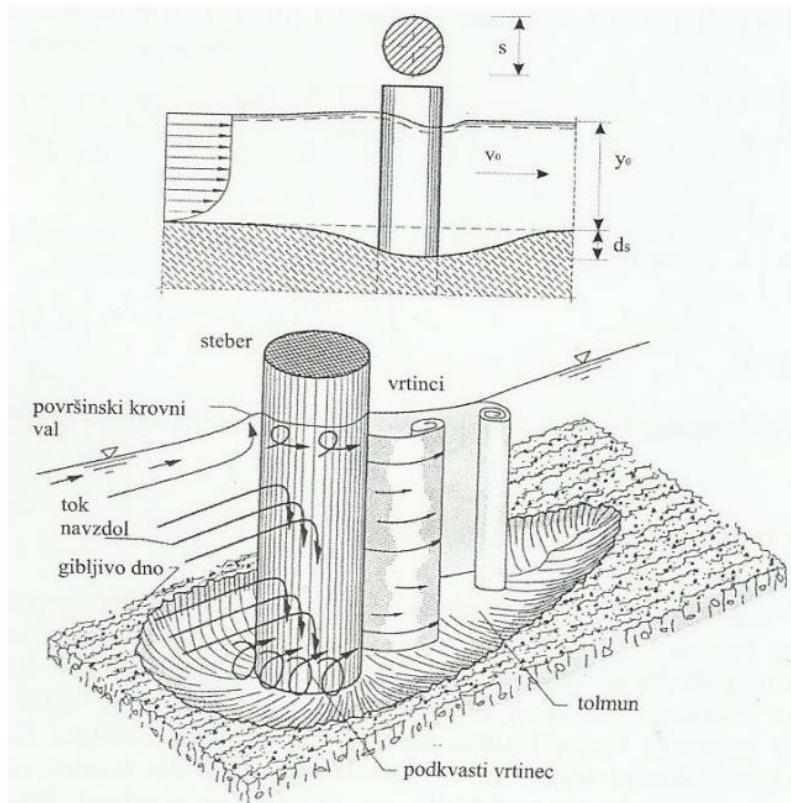
Premostitveni objekti (mostovi) morajo predstavljati strukturo, ki je zanesljiva in varna. Obenem je zaželena čim manjša vpadljivost v okolje. Vplivi premostitvenih objektov na okolje se kažejo v spremembi vodnega režima, povišanju pretokov in gladin dolvodno in gorvodno. Premostitveni objekti so:

- Nadvozi
- Podvozi
- Mostovi
- Viadukti
- Podhodi
- Nadhodi
- Prepusti

Prosta odprtina pod mostom se dimenzionira na naslednje pretoke (Uradni list RS, št. 91/2005, 60. člen; vodotoki):

»Prosta odprtina pod mostom in v cestnem prepustu se dimenzionira za pretočno količino pogostnosti pojava visoke vode  $Q(100)$  na cesti s projektno hitrostjo večjo od 60 km/h in ceste v naselju ter za pojav visoke vode  $Q(20)$  na ostalih cestah. Za ceste višjih kategorij, je pametno dimenzioniranje premostitvenih objektov na podlagi poplav s povratno dobo 500 let«.

Dejavniki, ki pomagajo pri poškodovanju premostitvenih objektov so prekomerne obremenitve, delovanje vode in drugih snovi iz okolja, poškodbe pri trčenjih in pa erozija, oziroma spodjedanje mostnih opornikov, kar lahko vidimo na Sliki 1.



Slika 1: Razmere v vodnem toku pri obtekanju mostnega opornika (Steiman, 2010)

Za pravilno izvedbo globokega temeljenja je iz okolja potrebno pridobiti geološke, geotehnične, hidrogeološke in hidrotehnične informacije ter geološke in cestne podlage. Za trajnost in varnost premostitvenega objekta pa je najpomembnejši podatek, kako agresivno površinska ali podtalna voda vpliva na samo konstrukcijo. Mostne podpore predstavljajo oviro v vodotoku in spremenijo razmere v vodnem toku (Mikoš, 1996).

Sicer pa na dejansko globino erozijskega tolmana vplivajo (Žura, 2014):

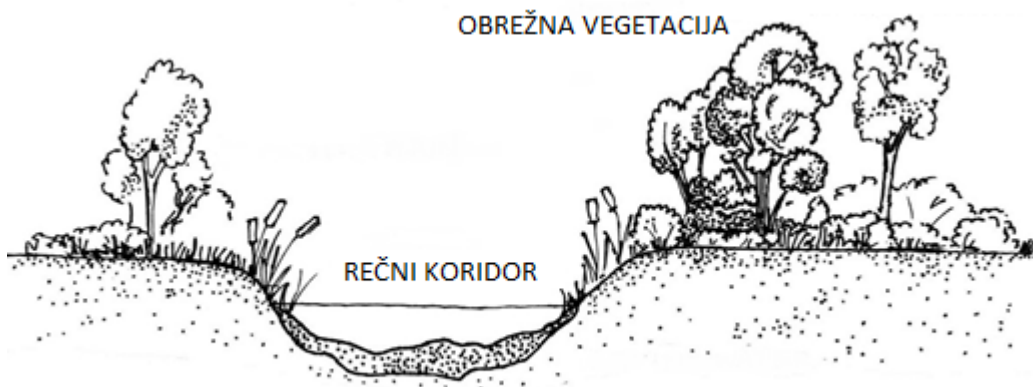
- širina dolžina in oblika stebra,
- pretočna globina in hitrost dotekajoče vode,
- zrnavost plavin v dnu,
- kot dotekanja vode k stebri,
- oblika dna struge,
- dotekajoče plavje.

Erozija je nevaren proces, ki preoblikuje rečno dno. Zato morajo biti temeljni mostnih opornikov sidrani dovolj globoko. Poleg dobrih temeljev pa je potrebna tudi njihova zaščita pred delovanjem erozije.

## 2 VEGETACIJA

### 2.1 Ekološka vloga obrežne vegetacije

Restavracija rečnega koridorja je eden najbolj aktualnih konceptov v hidrotehnik, je ponovna vzpostavitev strukture in funkcije ekosistema (*Taner et al., 2000*). Cilj obnove koridorja je vrnitev vodnih in obvodnih ekosistemov v prejšnje naravno stanje. Rečni koridorji so kompleksni ekosistemi, ki vključujejo rastline, živali, obdajajočo krajino in mrežo vodotokov.



Slika 2: Prečni profil rečnega koridorja in obrežja  
(<http://mtwatercourse.org/resources/page.php?pageID=36>)

Obrežne cone so vmesnik med vodnim in kopenskih ekosistemom (*Richardson et al., 2007*). Nanje vplivajo vodni procesi kot so, poplave, odlaganje naplavin, ponavadi pa podpira drugačno floro, ki se razlikuje od sosednje kopenske vegetacije po strukturi in funkciji. Obrežna vegetacija vpliva na različne ekološke funkcije v povezavi z vodnim habitatom, zagotavljanje hrane, moderacija temperature vode skozi evapotranspiracijo in senco, zagotavljanje pasu, ki filtrira usedline in nadzoruje hranila in stabilizira bregove. Prav tako pa tudi služi kot pas za premikanje živih organizmov, materialov, energije in ima veliko pomembnih vlog za človeka.

Veliko človeško povzročenih motenj, od lokalnih do globalnih območij vpliva na obrežne ekosisteme (*Richardson et al., 2007*). Neposredne hidrološke spremembe, ki so nastale zaradi jezov in regulacije pretoka, spreminjajo obliko in sestavo struge in obseg obrežnega habitata. Uporaba obrežnih zemljišč kot kmetijskih površin, lahko povzroči povečanje erozijskih procesov in spiranja. Ta povečan pretok pa

spodjeda bregove, kar povzroči degradacijo bregov. Poleg degradacije, homogen značaj spremenjene rečne struge zmanjša ekološki habitat, kateri potrebuje raznoliko okolje v katerem uspeva. Na njih lahko prav tako delujejo, sečnja, paša, teptanje, črpanje vode in rekreacija. Take motnje se pogosto pojavljajo ali delujejo kot sprožilci za širjenje tujih invazivnih vrst rastlin (veliko brežin vodotokov v Ljubljani je obraščenih z invazivnim japonskim dresnikom), povečala se je diverziteteta in številčnost tujih rastlin po celem svetu. Tako lahko obilica tujih vrst rastlin pripelje do radikalnih sprememb v strukturi in funkciji rečnega koridorja.

Ena metoda vzpostavitve rečnega koridorja in zmanjšanja hitrosti pretoka, je uvedba vegetacije na izmenjujočih mestih, za preusmeritev toka in povzročitev odlaganja sedimenta. Erozijski kanal je velik problem, povzroča pa dva glavna problema. Izguba virov habitata in estetika rek.

## 2.2 Funkcije obrežne vegetacije

Rastline, ki razvijejo velika in gosta lesnata stebela, lahko zmanjšajo hitrost vode, s tem povečajo nivo podtalnice in tako spet vplivajo na hidrološki krog. Rastline posredno ali neposredno sodelujejo pri kroženju hranil, na primer lahko zmanjšajo nivoje dušika ali drugih mineralov iz reke ali podtalnice (Schade *et al.*, 2001), vplivajo na slanost zemlje, organske snovi, C:N razmerja, odvisno od velikosti in kemijske sestave njihovega odpada. Vplivajo na stopnjo sedimentacije in odpornost tal na erozijo med poplavami. Zagotavljajo hrano za zrnoredce in rastlinojedce, zagotavljajo kritje in gnezdišča za veliko vrst živali. Z zmanjšanjem poraščenosti rastlin, pa se znižajo funkcije kot so obrežna stabilizacija, prečiščevanje vode, raznolike živalske združbe, napolnitev vodostajev... (Hooper *et al.*, 2005).

Z manjšim odvodnjavanjem vode, lahko pride do izmenjave rastlinske vrste do rastlin z globljimi koreninami, intenzivna paša pripelje do zamenjave med travam trajnicam do razrasta grmovja in dreves, izčrpavanje hranil pod akumulacijskim jezerom lahko pripelje do povečanja rasti rastlin, ki potrebujejo veliko dušika in obogatitev hranil povezanih s kmetijstvom privede do evtrofnih vrst.

## 2.3 Vpliv vegetacije na hidravlične razmere v strugi

Pri napovedovanju obnašanja vodnih nivojev so uporabljeni računalniški modeli. Pomemben parameter je upor hrapavosti (Galema, 2009). Vegetacija nudi odpornost toku vode, zato je njegova napoved pomembna pri obvladovanju poplav. Dober opis pretočnega upora je ključnega pomena, saj determinira hitrosti toka in vodnega stanja.

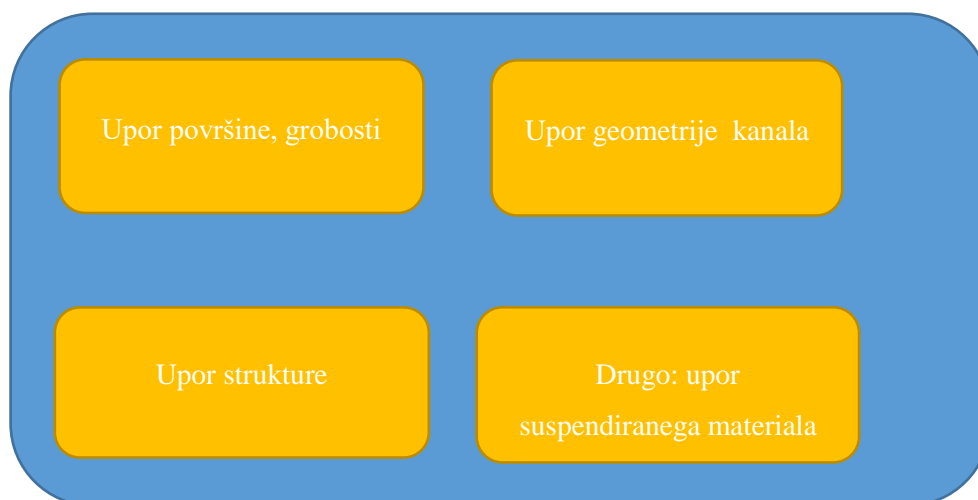
Zaradi mnogih vrst vegetacije in njihovih edinstvenih karakteristik, je težko napovedati njihov upor toku vode. Tako so pri modeliranju pomembne spremenljivke kot so nehomogenost, njihova struktura,

trdnost, kjer se netrdna vegetacija lahko upogne in tako poveča upornost, potopljenost,... Pri izpeljavi teoretičnih opisov, je prvi korak uporaba poenostavljene predstavitve vegetacije. To je temelj bolj zapletenih situacij, kot so listje, razvejanje vegetacije, ...

Vegetacija na poplavnih površinah lahko močno vpliva na hitrost vode in vodostaj. Sila trenja med podlago in vodotokom zaradi hrapavosti podlage je upor toka na ostenju. Oblikovni upor je odvisen od vodne globine, lastnosti vegetacije in hitrosti toka. Oblikovni upor ima na močno poraščenih območjih z grmovjem in drevesi velik vpliv na vodno globino. Več kot je potopljene vegetacije, večji je upor vodnemu toku. Za razliko od upora trenja, ki v strugi vodotoka pada z naraščanjem vodostaja zaradi relativnosti velikosti ovir vodnemu toku, se upor oblike zarasti z globino vode večja (Mikoš et al., 2009).

## 2.4 Upor vegetacije

Upor vegetacije predstavlja turbulenco, ki jo povzročijo površinske lastnosti, geometrijske meje, ovire in drugi faktorji, ki povzročajo izgubo energije. Koeficient upora odraža dinamično obnašanje kot so izgube momenta ali energije. Sestavljen je iz štirih delov:



Slika 3: Shema sestavljenosti upora pretoka (Galema, 2009)

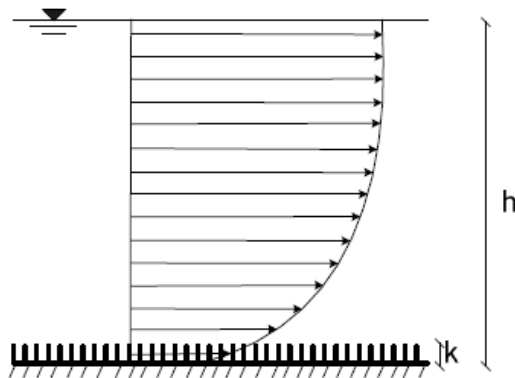
Hrapavost predstavlja vpliv površine na oduvanje energije. Geometrijski upor se nanaša na geometrijo kanala, na primer, oblika kanala, meandri, ovinki, ... strukturni upor nastane zaradi oblike objekta (geometrija površine, vegetacija, struktura, rečno dno,...). Drugi faktorji, ki lahko vplivajo na upor rečnega toka, pa so suspendiran material, valovi, veter.

## 2.5 Vertikalni profili pretoka

Profil hitrosti pretoka je različen za potopljene in nepotopljene rastline. Ta razlika je predstavljena za poenostavljeno togo cilindrično vegetacijo brez stranskih vej in listja. Ločiti je lahko naslednje tri situacije (*Kleinmans, 2008*):

### 2.5.1 Pretok čez dobro potopljeno vegetacijo $h \gg 5 \cdot k$

$H$  predstavlja vodno globino,  $k$  pa višino vegetacije. Kot je pokazano v sliki, je hitrost v globljem delu upočasnjena zaradi vegetacije. Ne upočasnijo pa hitrosti v zgornjem delu.

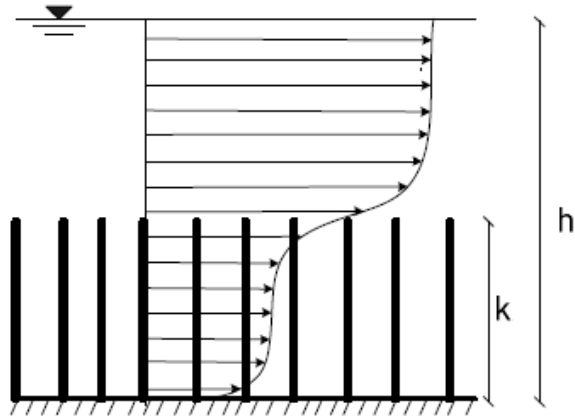


Slika 4: Pretok čez dobro potopljeno vegetacijo (*Galema, 2009*)

### 2.5.2 Pretok skozi in potopljeno vegetacijo $5 \cdot k > h > k$

Vegetacija je relativno visoka globini toka. Profil hitrosti toka je spremenjen. Na dnu reke na hitrost vpliva hrapavost dna. Znotraj vegetacije, dovolj stran od dna in dovolj proč od vrha vegetacije, je hitrost enotna (*Baptist, 2006*). Na vrhu vegetacije, je prehodni profil med hitrostjo znotraj vegetacije in hitrosti višje nad njo. Velja predvsem za tok po poplavnih območjih.

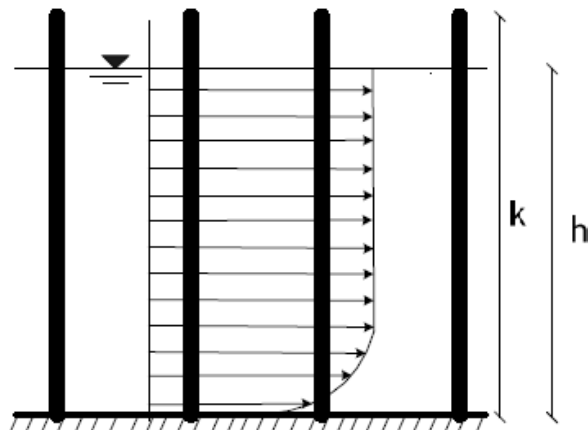




Slika 5: Pretok skozi in potopljeno vegetacijo (Galema, 2009)

### 2.5.3 Pretok skozi potopljeno vegetacijo: $h < k$

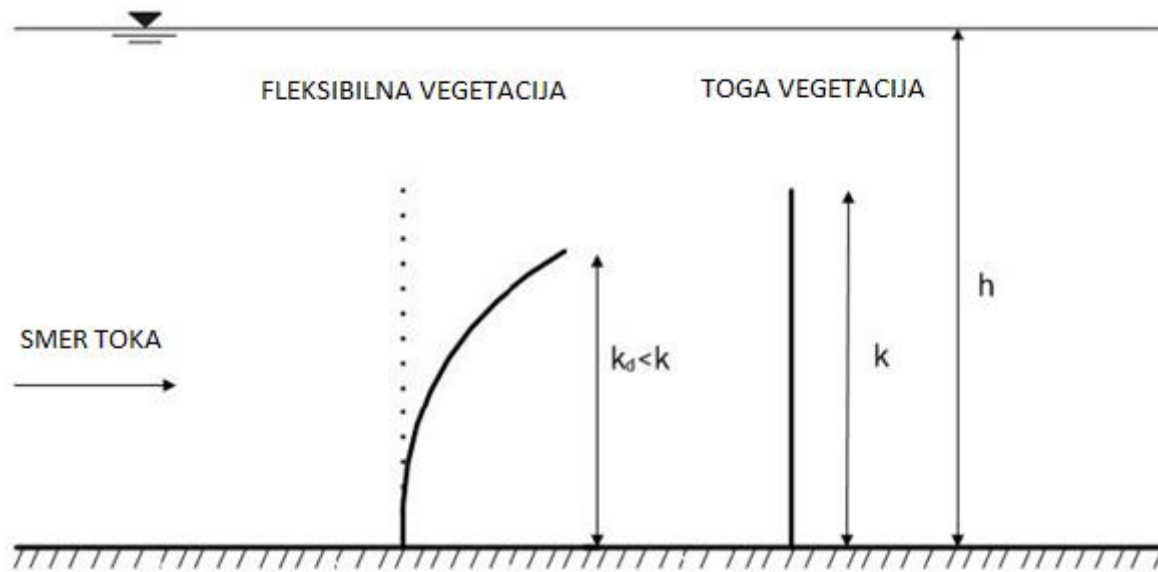
Hitrost, ki je dovolj odmaknjena od dna je enotna. Na dnu je nižja zaradi hrapavosti dna. S cilindričnimi rastlinami, hitrost postane konstanta skozi globino (zanemarimo hrapavost dna). Velja predvsem za tok po poplavnih območjih.



Slika 6: Pretok skozi potopljeno vegetacijo (Galema, 2009)

## 2.6 Togost in fleksibilnost rastlin

Pri potopljenih in nepotopljenih rastlinah, se ločijo fleksibilne od togih rastlin. Koefficient upora fleksibilnih rastlin se zmanjša, ko se rastlina upogne.

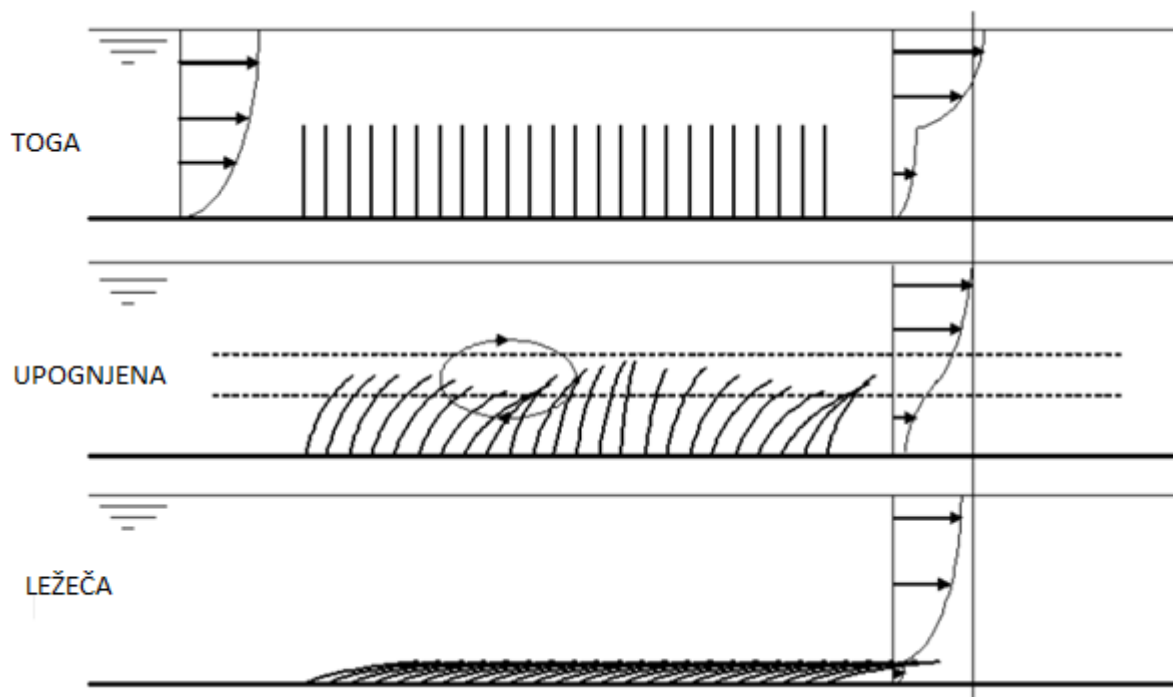


Slika 7: Togost in fleksibilnost rastlin (Galema, 2009)

Obnašanje fleksibilnih rastlin je odvisno od pogojev toka, zato je njihovo obnašanje težavnejše. Upogibanje potopljenе vegetacije vpliva na povprečno hitrost.

Pri potopljeni fleksibilni vegetaciji, ločimo tri konfiguracije, ki so odvisne od hitrosti pretoka in karakteristike rastlin (Carollo, 2005).

- pokončna vegetacija, ki ne menja svojega položaja
- vegetacija, ki je izpostavljena valovanju in tako menja svoj položaj
- vegetacija, ki je stalno nagnjena naprej



Slika 8: Usmerjenost vegetacije (Galema, 2009).

Pri majhnih hitrostih pretoka, kaže fleksibilna vegetacija togo obnašanje. V drugem in tretjem primeru je obnašanje rastline odvisno od hitrosti pretoka in upogibne togosti. Ker se upogibanje rastlin v času spreminja, se spreminja tudi njihova višina in posledično se poveča in zmanjša upornost (Galema 2009).

## 2.7 Listje in razvejanost

Večina rastlin ima tudi listje in veje. Te se premikajo iz strani na stran kot rezultat fizičnega kontakta in interakcije toka (Green, 2005). Toda, ko je razdalja med rastlinami daljša od 30 kratnega premera stebela, je ta interakcija zanemarljiva (Meursing, 1995). Pomembna je tudi fleksibilnost rastlin, saj se pri velikih hitrostih listje upogne. Tako ima lahko fleksibilna rastlina z veliko listi, manj upora kot trdna rastlina z minimalnim številom listov (Wilson et al., 2008, Freeman et al., 2000). Koeficient odpornosti se spreminja s spremembo hitrosti.

Koeficient hrapavosti se skozi sezono spreminja. Medtem ko pozimi rastline nudijo minimalni odpor, iste rastline pomladi, ko se začne ozelenitev, rast in podrast, nudijo večji odpor in posledično večjo vrednost koeficienta hrapavosti.

## 2.8 Manning

Pri vodotokih imamo silo težnosti, ki poganja vodotok in nasprotne sile, ki ga zavirajo. Med te sile spada tudi hrapavost, ki ima velik vpliv na hidravlične razmere v vodotoku. Za primerno ocenitev vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti, potrebnega v izračunih, moramo poznati faktorje, od katerih je hrapavost odvisna.

Vpliv vegetacije na vodni tok se v celoti upošteva preko koeficienta hrapavosti. Izrazito zmanjšuje kapaciteto kanala in zavira pretok. Hrapavost je odvisna od višine, gostote, distribucije in vrste vegetacije. Več kot je vegetacije, večji je koeficient hrapavosti  $n$ . Vodni tok z zadostno globino in pretočno hitrostjo, prepogne in potopi vegetacijo, zato manjši  $n$ , če pa je ta kanal grob in travnat, je lahko  $n$  večji. Kanali z strmim dnom, imajo zaradi večje hitrosti in zaradi sploščenja vegetacije, manjši upor in manjši  $n$ .

V primeru, da začne vodotok poplavljati, se vrednost  $n$  spreminja v odvisnosti od globine vode na posameznih delih prečnega profila. Velikost  $n$  poplavnih ravnin je ponavadi večji kot  $n$  kanala. Na poplavnih ravninah je tako vpliv zarasti, posebno pri nižjih vodostajih, zelo velik.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

V enačbi nastopajo naslednji parametri:

- površina pretočnega prereza ( $A$ , [m<sup>2</sup>]),
- omočeni obod pretočnega prereza ( $P$ , [m]),
- hidravlični radij  $R=A/P$  ([m]),
- naklon struge ( $S$ ),
- Manningov koeficient hrapavosti ( $n$ , [m<sup>-1/3</sup>s]).

VRSTA IN OPIS KANALA IN POPLAVNIH POVRŠIN	Minimalno	Običajno	Maksimalno
<b>Rečno korito</b>			
a. Čisto, ravno, polno in brez tolmunov	0,025	0,03	0,033
c. Vijugast, čist kanal s tolmoni in prodom	0,033	0,04	0,045
g. Počasni ravni del, z večjo količino pleveli in tolmunov	0,05	0,07	0,08
h. Korito močnejše poraščeno s plevelom in z globokimi tolmoni oziroma gosteje zaraščene poplavne poti	0,075	0,1	0,15
<b>Poplavne površine</b>			
<b>Travniki brez grmičevja</b>			
a. Nizka pokošena trava	0,025	0,03	0,035
b. Visoka trava	0,03	0,035	0,05
<b>Grmičevje</b>			
a. Posamezni grmi, goste pleveli	0,035	0,05	0,07
<b>Drevje</b>			
a. Čistina z drevesnimi štori in brez mladik	0,03	0,04	0,08
b. Čistina z drevesnimi štori in gostimi mladikami	0,05	0,06	0,12
f. Gost gozd z listjem (poleti)	0,11	0,15	0,2
<b>Stopnja meadriranja</b>	<b>1,0</b>	<b>1,15</b>	<b>1,30</b>

Preglednica 1: Vrednosti Manningov koeficientov hrapavosti (Yarnell, 1934)



Slika 9: Zaraslost brežin Gruberjevega prekopa na Cesti Hrdeckega ([www.google.com/maps](http://www.google.com/maps))

Za določanje koeficienta hrapavosti, je potrebno poznati faktorje od katerih je koeficient odvisen:

- hrapavost ostenja (hrapavost omočenega oboda kanala predstavlja osnovni parameter za ocenitev vrednosti za  $n_g$ , finejši kot je material na obodu, nižja je vrednost  $n_g$ ),
- rastlinstvo in vegetacija (upoštevati moramo vpliv zarasti, ki zaustavlja tok in s tem povečuje vrednost  $n_g$ , drevesa premera 0,15 m do 0,2 m, ki rastejo na brežinah in imajo nižje drevesne veje ustrezno prstrižene, ne ovirajo vodnega toka v tolikšni meri kot košato nizko rastje (Chow, 1959),
- poljubna spremenljivost (spreminjanje rečnih presekov vodotoka, omočenega oboda in oblike vzdolž trase vodotoka),
- prepreke, ovire (dotok plavin, zastoji zaradi debel, padla drevesa,...),
- trasa vodotoka (meandri majhnega polmera znatno povečajo vrednost koeficienta  $n_g$ ),
- transport plavin in izpodjedanje (prisotnost obeh pojavov povzroča nenehno spreminjanje oblike korita),
- vodostaj in pretok (ko se povečata vodostaj in pretok, se vrednost  $n_g$  v večini vodotokov zmanjša, na nižji pretok imajo nepravilnosti v koritu (skale,...) odločilen vpliv na  $n_g$ ).

Izračun koeficienta  $n_g$  (Shen,1972):

$$n_g = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m$$

Kjer je:

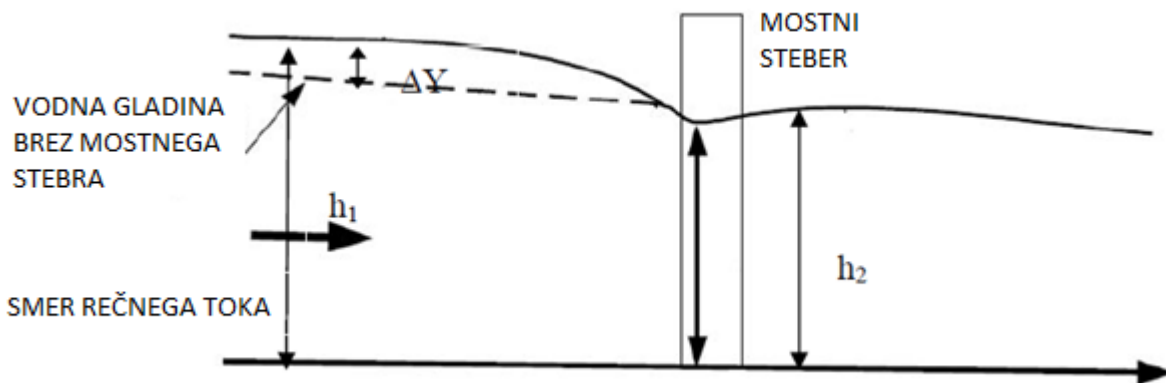
$n_0, n_1, n_2, n_3, n_4$  vpliv materiala, ki sestavlja korito, stopnja hrapavosti oboda, zaraslost z vegetacijo,...

M vpliv stopnje meadriranja vodotoka

### 3 OBJEKTI NA VODI

#### 3.1 Mostovi

Stebri, ki podpirajo most predstavljajo oviro rečnemu toku. Ko se voda v kanalu približa stebrom, se tok zoži, da lahko preide most, preden se zopet razširi v celotno širino kanala. Ko zožen tok prehaja skozi oviro pospeši, kar povzroči znižanje vodne gladine. Po oviri, ko se tok razširi, pa se višina vodne gladine vrne v prvotno stanje. To krčenje in širitev rezultira v izgubi hidravličnega tlaka, kar povzroči povišanje rečne gladine gor vodno mostu in ima negativen vpliv na strukturo mostu, ki je kriva za spodjedanje stebrov. Količina zadržane vode je odvisna od oblike stebrov, njihovega števila, njihove postavitve, pretoka in zoženja kanala.



Slika 10: Zvišanje vodne gladine zaradi ovire (E.W.Publications, 2011)

Upor je sestavljen iz treh komponent (E.W. Publications, 2011). To so upor površine stebrov, upor, ki ga povzročijo valovi in upor, ki je razlika med visokim pritiskom v coni mirovanja in nizkim pritiskom dolvodno v turbulentnem stanju. Narastek pritiska gorvodno prihaja iz spremembe kinetične v potencialno energijo v coni mirovanja.

Dano je razmerje med naraslo in nemoteno vodno gladino v nekritičnem pretoku (Yarnell, 1934).

$$\left[\frac{\Delta y}{y}\right]_{empirično} = K(K + 5Fr^2 - 0,6)(\alpha + 15\alpha^4)Fr^2$$



- $\Delta y$  narastek vode povzročen z mostnimi stebri ( $h_1-h_2$ )
- $Y$  globina nemotene vodne gladine dolvodno ( $h_2$ )
- $Fr$  ustrezno Froudevo število dolvodno
- $\alpha$  razmerje med površino nemotenega pretoka in površino pretoka motenega zaradi mostnih stebrov
- $K$  koeficient, ki pripada obliki mostnih stebrov

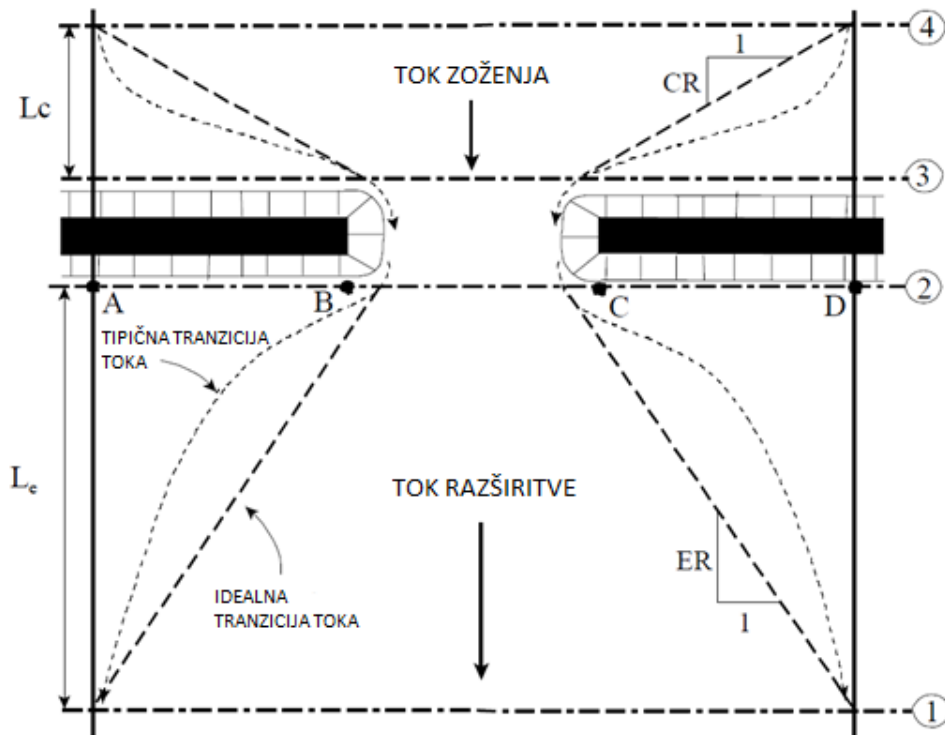
Koeficienti  $K$ , ki jih je podal Yarnell:

OBLIKA STEBRA	KOEFICIENT OBLIKE
POLKROŽNI NATOČNI IN ODTOČNI DEL STEBRA	0.9
TRIKOTNI NATOČNI IN ODTOČNI DEL STEBRA	1.05
KVADRATEN NATOČNI IN ODTOČNI DEL STEBRA	1.25

Preglednica 2: Koeficienti, ki pripadajo obliki mostnih stebrov (E.W. Publications, (2011))

Hidravlične osnove izračuna toka vode na odsekih vodotokov, kjer so mostovi, so predstavljene v nadaljevanju z vidika delovanja hidravličnega modela Hec-Ras.

### 3.2 Modeliranje toka vode skozi mostne odprtine s hidravličnim modelom Hec-Ras



Slika 11: Tlorisni pregled vodnega kanala in mostnih stebrov (US army corps of engineers, 2010)

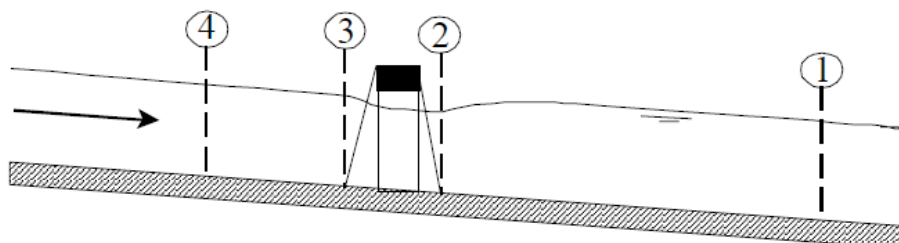
Analiziramo lahko vpliv različnih objektov, kot so mostovi, nasipi in drugo. Rezultati nam pokažejo razmere v posameznih rečnih profilih, krivulje pretokov, energijske izgube, nivoje rečne gladine. Na voljo so nam grafični, tabelarni rezultati, shema rečnega korita, hidrogrami in tri dimenzijski prikaz rečnega korita.

HEC-RAS izračunava energijske izgube zaradi struktur v treh delih, v štirih prečnih presekih. Prvi del so izgube energije, ki nastanejo takoj po prehodu ovire, drugi del so izgube pri oviri in tretji pred njo.

Prvi prečni presek je dovolj dolvodno od ovire, ko se tok povsem razširi. Lociran je dovolj dolvodno, da zgradba gorvodno nima nanj nobenega vpliva. Razdalja razširitve je odvisna od kota ovire, oblike ovire, velikosti toka in hitrosti toka. Drugi prečni presek je lociran za oviro. Predstavlja prečni presek na naravni podlagi in ne na umetni zgradbi. Tretji prečni presek je pred oviro, na naravnem rečnem kanalu. Razdalja med zgornjim tokom in oviro predstavlja nenadno pospeševanje in zoženje toka. Četrti prečni presek je gorvodno ovire, kjer je tok paralelen. Razdalja zoženja je krajša kot razdalja razširitve.

### 3.3 Energijske izgube zaradi zoženja in razširitve

Izgube so določene med izračuni gladine vode v računskih prečnih prerezih (*US army corps of engineers, 2010*). Za računanje izgub zaradi trenja je uporabljena Manningova enačba. Druge izgube pa so določene kot zmnožek koeficientov ter absolutno vrednostjo razlike v hitrosti med prerezi. Zoženje nastane med prerezom 4 in 3, medtem ko razširitve nastane med prerezoma 2 in 1.



Slika 12: Slika prečnih presekov (*US army corps of engineers, 2010*)

Ko se hitrost v smeri dolvodno poveča zaradi zožitve toka, je uporabljen koeficient zoženja, ko pa se hitrost zmanjša zaradi razširitve toka, je uporabljen koeficient razširitve. Ponavadi so izgube zaradi razširitve večje kot izgube zaradi zoženja, kot so tudi izgube zaradi nenadnih sprememb večje, kot izgube postopnega spreminjanja.

### 3.4 Hidravlični izračuni skozi most

HEC-RAS dovoljuje analiziranje mostu z različnimi metodami, brez spremembe mostne geometrije. Izbiramo lahko med nizkim pretokom, pretokom čez most, tlačnim pretokom in potopljenim pretokom (*US army corps of engineers, 2010*).

Hec-ras ima zmožnost računanja hidravličnih razmer pri visokih pretokih in sicer z metodo energijske enačbe ali z metodo hidravličnih enačb za pretok čez most in tok pod tlakom (*US army corps of engineers, 2010*).

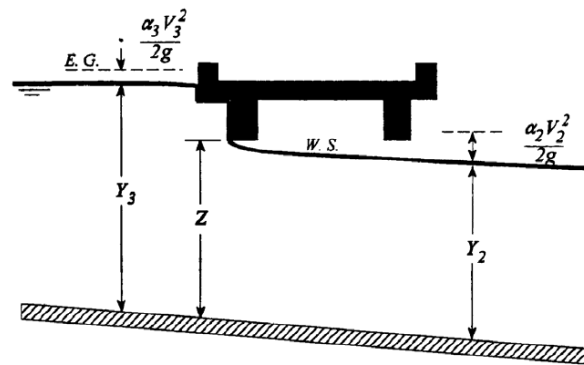
Pri energijski enačbi izračuni temeljijo na uravnoveženju enačbe v treh korakih skozi most. Energijske izgube temeljijo na izgubah zaradi trenja, zoženja in razširitve pretočnega prereza. Metoda energijskih izgub izvaja vse izračune po principu toka s prosto gladino. Znotraj mostu je območje, ki je ovirano z

mostnimi stebri, oporniki in samim mostom, odšteto z območja pretoka, vstavljena pa je dodatna poplavljenja meja.

Drugi pristop za računanje visokih pretokov pa je uporaba različnih enačb za izračun toka pod tlakom ali pretoka čez preliv.

Tok pod tlakom se pojavi, ko voda pride v kontakt z najnižjo točko mostu. Ko pretok pride v kontakt z mostom gorvodno, se pojavi zajezitev in nastane pretok skozi zoženje. Poznamo dva tipa pretoka skozi zožitev mostne odprtine. Prvi je, ko vodna gladina doseže mostno ploščo na gorvodni strani, drugi pa ko vodna gladina doseže mostno ploščo še na dolvodni strani.

### 3.4.1 Potopljena je samo zgornja stran mostu.



Slika 13: Vzdolžni presek mostu ob potopljeni zgornji strani (US army corps of engineers, 2010)

$$Q = C_d A_{BU} \left[ 2g \left( Y_3 - \frac{Z}{2} + \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Q      totalen izpust skozi mostno odprtino

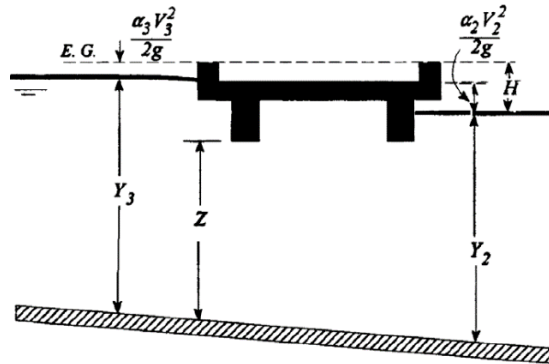
$C_d$     koeficient izpusta tlačnega pretoka (0,27 – 0,5)

$A_{BU}$     neto površina mostne odprtine pri odseku BU

$Y_3$     hidravlična globina pri odseku 3

Z      vertikalna dolžina najnižje mostne točke do vodnega dna pri odseku BU

### 3.4.2 Potopljeni sta obe strani mostu



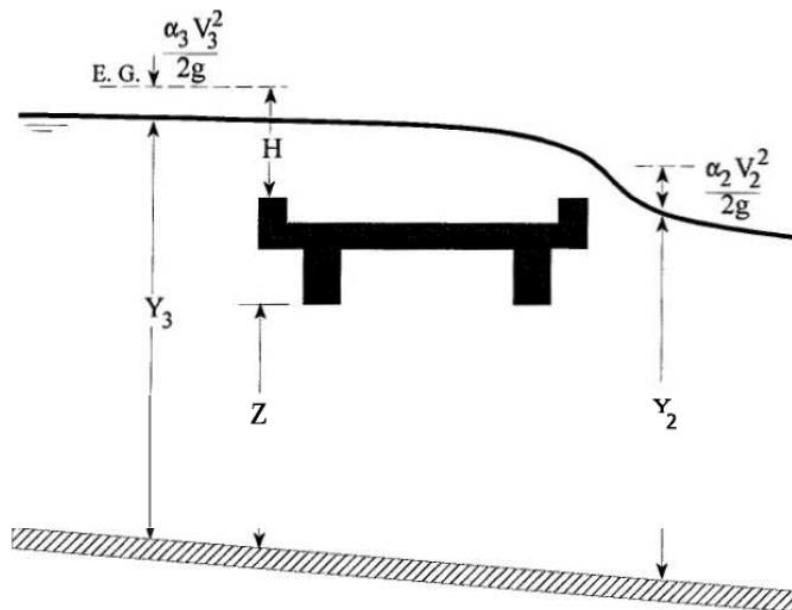
Slika 14: Vzdolžni presek mostu, potopljeni obe strani mostu (US army corps of engineers, 2010)

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

- C koeficient izpusta za popolno potopljen tlačni pretok (tipična vrednost 0,8)
- H razlika med energijskim gradientom gorvodno in višino vodne gladine dolvodno
- A površina mostne odprtine

### 3.4.3 Pretok čez most

Za pretok čez most je uporabljena standardna enačba za pretok čez most, običajno upoštevan kot tok vode preko širokega praga.



Slika 15: Vz dolžni presek popolno potopljenega mostu (US army corps of engineers, 2010)

$$Q = CLH^{3/2}$$

- Q pretok čez most
- C koeficient izpusta za pretok čez most
- L efektivna dolžina pretoka
- H razlika v višini med energijo gorvodno in najvišjo točko ceste

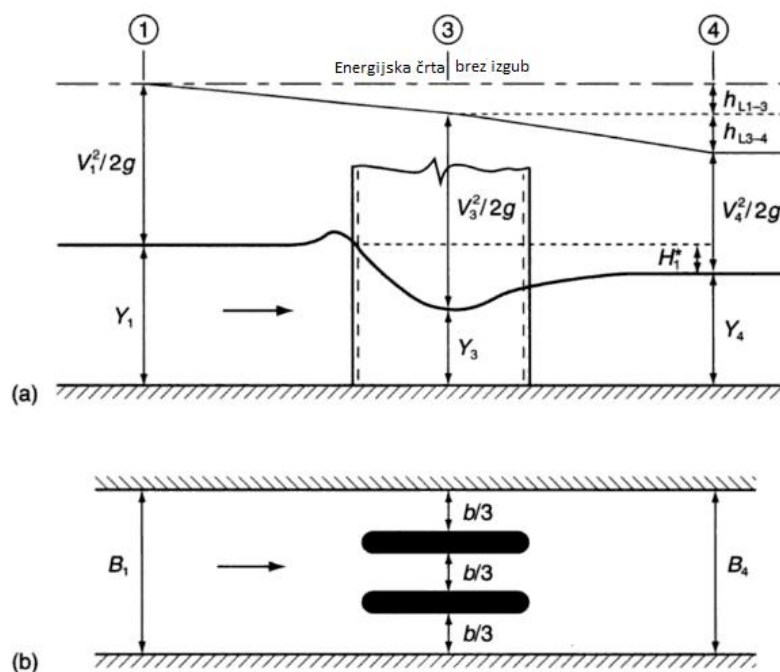
Ko je most močno potopljen, program avtomatsko preklopi na računanje vodne gladine gorvodno z energijsko enačbo. Maksimalna potopljenost je 0,95 (95).

### 3.5 Izbira pristopa modeliranja mostu

Za nizke pretoke, kjer je vodna gladina pod najnižjo točko mostu, so energijske in momentne enačbe najširše uporabljene (*US army corps of engineers, 2010*). Obe metodi upoštevata izgube zaradi trenja in spremembe v mostni geometriji. Metoda energije upošteva tudi dodatne izgube zaradi prehajanja toka med prečnimi preseki različne geometrije. Momentna metoda pa lahko upošteva izgube zaradi mostnih stebrov.

### 3.6 Mostni oporniki

Mostni opornik nudi odpor toku vode. Ta odpor se lahko izrazi kot koeficient oblike mostnih opornikov. Najbolje se koeficient oblike mostnih opornikov uporablja z enačbo d'Aubuissona in Naglerja.



Slika 16: (a) vzdolžni prerez in (b) tlorisni pogled (Hamill, 1999)

#### 3.6.1 D'Aubuisson

D'Aubuissonova enačba je pridobljena s predpostavko o horizontalnem dnu in apliciranju Bernoullijeve enačbe na odsekih 1 in 3. (Hamill, 1999)

$$Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Y_3 + \frac{V_3^2}{2g} + h_{L1-3}$$

$h_{L1-3}$  je izguba energije med odsekom 1 in odsekom 3, ki jo je povzročilo zoženje. D'Aubuissonova metoda predpostavlja, da se relativno visoka kinetična energija na odseku 3 ne pretvori v potencialno na odseku 4. Metoda predpostavi, da je  $Y_3=Y_4$ , iz česar dobimo:

$$H_1^* = \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + h_{L1-3}$$

Če je  $b$  celotna širina pretoka, potem lahko pretok izrazimo kot:

$$Q = bY_4V_3 = bY_4 \left[ 2g \left( H_1^* + \frac{V_1^2}{2g} - h_{L1-3} \right) \right]^{1/2}$$

Z vpeljavo koeficienta  $K_A$  (predstavlja energijske izgube), ki dovoli znižanje energije zaradi zoženja pretoka med oporniki ( $h_{L1-3}$ ), dobimo:

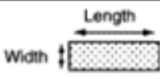





$$Q = K_A b Y_5 (2g H_1^* + V_1^2)^{1/2}$$

Koeficient  $K_A$  je pogosto pridobljen iz Yarnellovih študij. Tipično ima vrednost med 0,90 in 1,05 (Hamill, 1999). Za dan pretok se lahko izračuna normalna globina ( $Y_4$ ) in potem pridobi  $H_1^*$  z poskušanjem. Za visoko turbulentne pretoke je D'Aubuissonova enačba pravilna izbira, za nizko turbulentne pa je prava izbira Naglerjeva enačba.

### 3.6.2 Nagler

Nagler je leta 1918 predstavil rezultate 256 eksperimentov, kjer je bil cilj določiti relativno oviranje pretoka vode zaradi različnih oblik mostnih opornikov.

Vrednosti koeficienta  $K_A$  in  $K_N$  za mostne opornike

Tip mostnega opornika	Razmerje mostne odprtine, $M$									
	0.90		0.80		0.70		0.60		0.50	
	$K_A$	$K_N$	$K_A$	$K_N$	$K_A$	$K_N$	$K_A$	$K_N$	$K_A$	$K_N$
 Kvadratni natočni in odtočni del	0.96	0.91	1.02	0.87	1.02	0.86	1.00	0.87	0.97	0.89
 Polkrožni natočni in odtočni	0.99	0.94	1.13	0.92	1.20	0.95	1.26	1.03	1.31	1.11
 Trikotni natočni in odtočni del	–	0.95	–	0.94	–	0.92				
 Dvojni cilindrični mostni opornik	–	0.91	–	0.89	–	0.88				
 Dvojni povezani cilindrični mostni opornik	–	0.91	–	0.89	–	0.88				
 Natočni in odtočni del v obliki	1.00	0.95	1.14	0.94	1.22	0.97				

Preglednica 3: Tipi mostnega opornika in koeficienti oblike mostnih opornikov (Yarnell, 1934)



Enačba temelji na predpostavki, da teče pretok med mostnimi oporniki skozi majhno odprtino z razliko o tlačni višini.

$$Q = K_N A_3 \sqrt{2gh}$$

Kjer je:

$K_N$ .....koeficient izliva

$A_3$ .....prečna površina pretoka med mostnimi oporniki

Končna Naglerjeva enačba je:

$$Q = K_N b \sqrt{2g} \left( Y_4 - \theta \frac{V_4^2}{2g} \right) \left( H_1^* + \beta \frac{V_1^2}{2g} \right)^{1/2}$$

Kjer je:

$\theta$ .....korekcijski faktor vrednosti 0,3 (v primeru, da imajo mostni oporniki malo ali nič vpliva na pretok je vrednost 0)

$\beta$  .....korekcijski faktor, ki je odvisen od razmerja mostne odprtine, kot prikazano na diagramu 1:

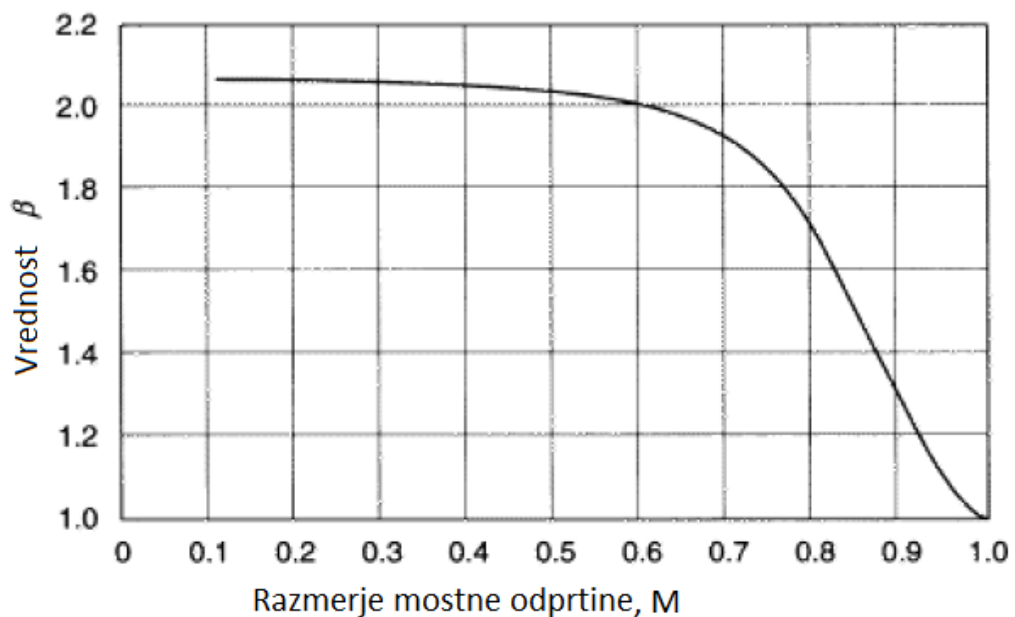


Diagram 1: Vrednost korekcijskega faktorja  $\beta$ , za pretok po mostnih opornikih (Hamill, 1999)

Naglerjeva enačba je bolj komplicirana kot enačba d'Aubuissona, toda zaradi obnovitve energijske višine dolvodno odseka 3 in pa odsotnosti predpostavke  $Y_3=Y_4$ , je točnejša pod pogoji nizke turbolentnosti.

### 3.6.3 Yarnell

Yarnell je med leti 1927 in 1931 naredil 2600 poizkusov glede vpliva mostnih opornikov na pretok vode. Njegov cilj je bil oceniti pretok ob opornikih različnih oblik in dolžin. Prav tako je določil vrednost koeficientov  $K$  v d'Aubuissonovi in Naglerjevi enačbi in preučil natančnost njih samih.

Ugotovil je:

- D'Aubuissonova in Naglerjeva enačba nista zanesljivi za velike pretoke, zaradi prehoda med tokom s prosto gladino in tokom pod tlakom,
- elipsasti in polkrožni mostni oporniki so najboljša izbira pri nizkih in malo turbulentnih pretokih,
- dvojni povezani cilindrični mostni oporniki so slabša izbira,
- pravokotni mostni oporniki so najmanj primerni oziroma nudijo največ odpora,
- optimalno razmerje med dolžino in širino mostnega opornika je med 4 in 7,
- majhne razlike v uporih so med oporniki, ki so vzporedni z vodnim tokom in oporniki, ki so rotirani manj kot  $10^\circ$ .

Obstajata dva glavna tipa pretoka. Pretok razreda A ali mirni tok in pretok razreda B ali deroči tok. Yarnell je prikazal pretoka in njihove povezave v tabeli.

**Za mirni tok:**

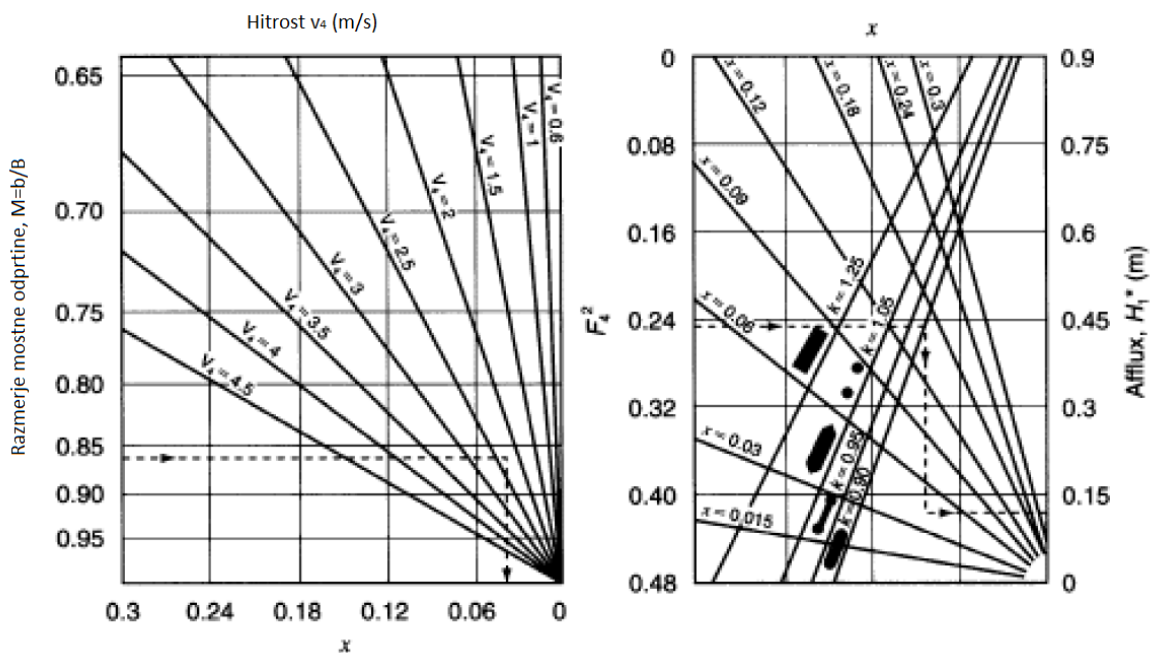


Diagram 2: Diagram odčitavanja razlike višine vode dolvodno in med mostnimi oporniki (Hamill, 1999)

Za uporabo diagrama je potrebno:

- izračunati razmerje mostne odprtine  $M$  in hitrost  $v_4$ ,
  - $M = b/B$  kjer je  $b$  širina mostne odprtine in  $B$  širina rečnega kanala
- na levem diagramu odčitati vrednost  $M$ , se premakniti horizontalno do nagnjene črte, ki predstavlja vrednost  $v_4$  in vertikalno na osi odčitati vrednost  $x$ ,
- izračunati Froudovo število in ga kvadrirati,
- se postaviti na desen diagram na vrednost  $F_4^2$ , se premakniti horizontalno do nagnjene črte, ki predstavlja obliko mostnega opornika in vertikalno (navzgor ali navzdol) določiti stečiče z vrednostjo  $x$ ,
- na koncu je potreben še horizontalen pomik za pridobitev povečanja višine  $H_1^*$ .

### Za deroči tok

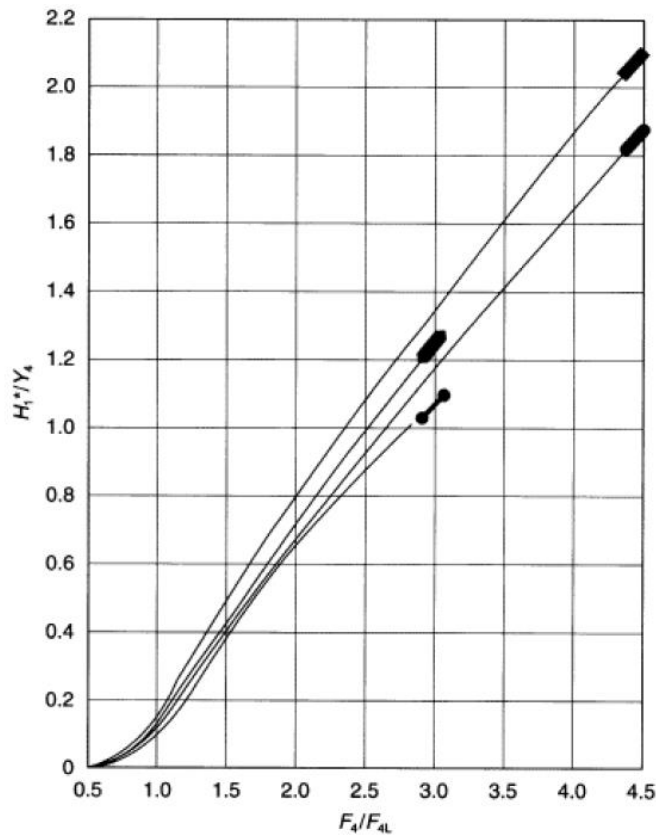


Diagram 3: Diagram odčitavanja razlike višine vode dolvodno in med mostnimi oporniki pri deročem toku (Hamill, 1999)

- če vemo vrednost  $y_4$  (višina rečne gladine na odseku 4), potem najprej izračunamo Froudovo število  $F_4$  in razmerje mostne odprtine  $M$ ,
- iz vrednosti  $M$  dobimo Froudovo število kritične globine iz enačbe  $M_L^2 = \frac{27\varepsilon^3 F_4^2}{(2+F_4^2)^3}$ ,
- na diagramu odčitamo razmerje  $F_4/F_{4L}$ , kjer je  $F_4$  Froudovo število v dolvodnem odseku,  $F_{4L}$  pa Froudovo število v dolvodnem odseku, ko pride med stebroma do kritičnega odtoka, se pomaknemo navzgor do pravilne oblike mostnega opornika in nato horizontalno levo, kjer odčitamo vrednost  $H_1^*/Y_4$ .

○  $H_1^* = Y_4 [H_1^*/Y_4]$

### 3.7 Preliv

Prečni hidrotehnični objekti so ovire preko katerih teče voda. Z njimi ustvarimo lokalno zaježbo pri nižjih in srednjih pretokih. Ko pride do večjih pretokov, moramo zagotoviti odtok vode brez previsokega dviga gladine gorvodno ovire. Poznamo več vrst pregrad:

- preliv,
- jez,
- prag,
- talni prag,
- prepad.

Glede na karakteristike pregrad ( pregrade s fiksno koto krone in pregrade s spremenljivo koto krone) je prevajanje visokih voda možno na naslednje načine:

- odstranjeni zaporni elementi (dvignjene zapornice),
- padanje vode preko premičnega ali fiksne prelivne robu.
- odzemanje vode od glavnega toka (bočni preliv).

O prelivih govorimo, kadar je koto krone višja od gladine vode pod objektom. Možno je veliko razvrstitev prelivov:

- položaj osi preliva glede na glavni tok vode,
  - pravokoten,
  - poševen,
  - vzporeden,
  - sestavljen,
- glede na konstrukcijo,
  - ostrorobi,
  - vakumirani,
  - široki prag,
  - kratka prelivna krona,
  - preliv s posebno obliko,
- glede na vpliv spodnje vode,
  - popolni preliv,

- nepopolni preliv,
- Ozračenje spodnje konture prelivnega curka,
  - Ozračeni,
  - neozračeni,
  - prisesani,
- natočna stena preliva,
  - vertikalni,
  - nagnjeni proti toku,
  - nagnjeni s tokom.
- geometrija prelivnega prečnega prereza.
  - trikotni,
  - pravokotni,
  - trapezni,
  - proporcionalni,
  - sestavljeni prerez.

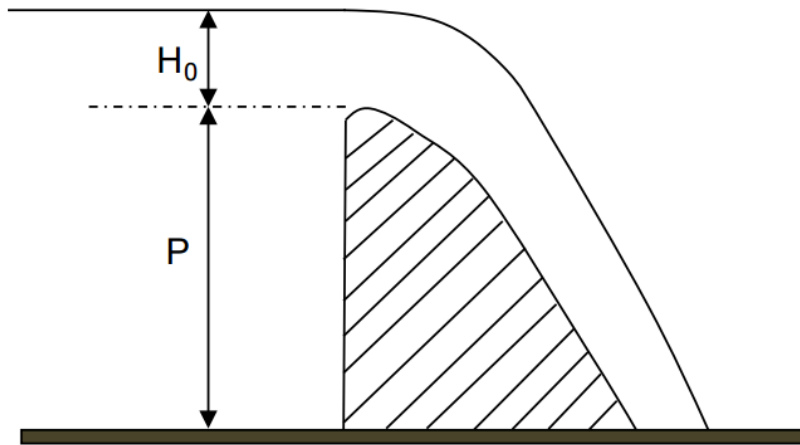
Najboljša izbira oblike je tista, kjer se pojavijo najmanjši odmiki toka od konstrukcije. Ko se tok odlepi od pregrade, pride do energijskih izgub, kar zmanjšuje prelivno sposobnost.

Za mostove sta značilna preliv čez široki prag ter preliv s praktično obliko.

### 3.7.1 Krivočrtni preliv

Ti preliv so najbolj pogosti. Zahtevajo dobro temeljenje in so locirani na sredini rečnega kanala. Struktura se deli na tri dele in sicer na krono, steno preliva in pa podslapje.

To so objekti, katerih oblika prelivnega hrpta sledi spodnji konturi prelivnega curka. Ker se v tem primeru curek ne odlepi od konstrukcije, je to brezvakumski profil. Kadar pa se pojavi odlepitev curka, se pojavijo podtlaki na obrisu pregrade, kateri povečajo prelivno sposobnost, povzročajo nestabilnost curka, poškodbe zgornjega sloja,...



Slika 17: Preliv s praktično obliko (USBR 1987)

Prelivi s praktično obliko so dimenzionirani za določen pretok  $Q_0$ , določeno prelivno višino  $H_0$  in posledično za določen koeficient  $C_0$  za ta pretok. Za katerakoli drugi pretok, ima prelivna višina vode drug koeficient.

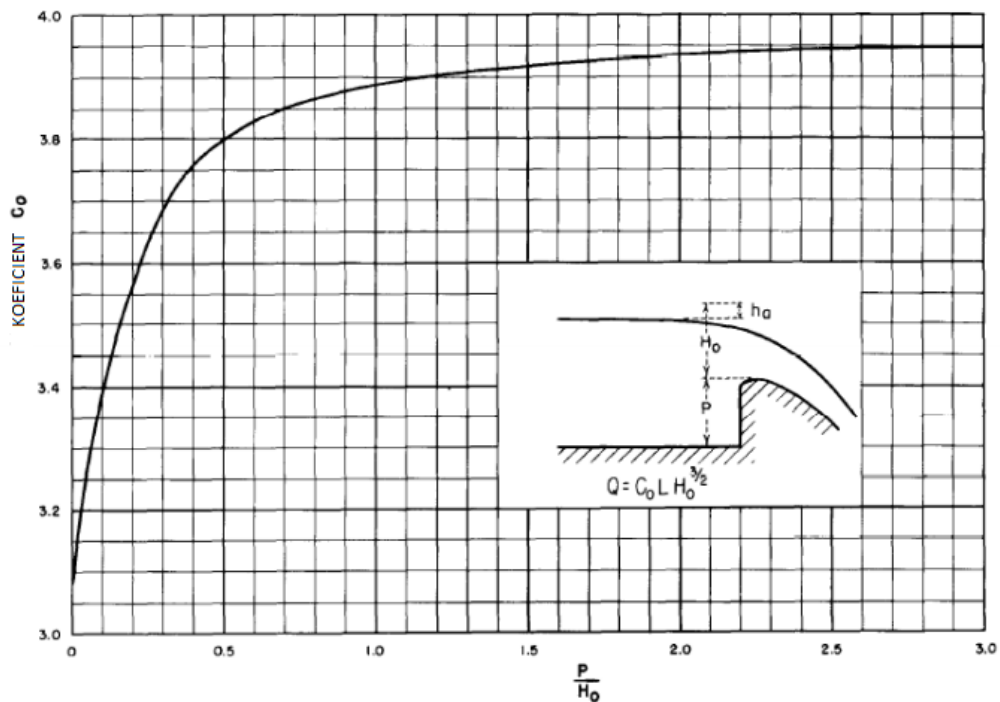


Diagram 4: Koeficient izliva za navpični preliv s praktično obliko

Ko pretok preide preliv, dolvodno pa je visoka voda, se bo izliv zmanjšal zaradi potopljenosti preliva.

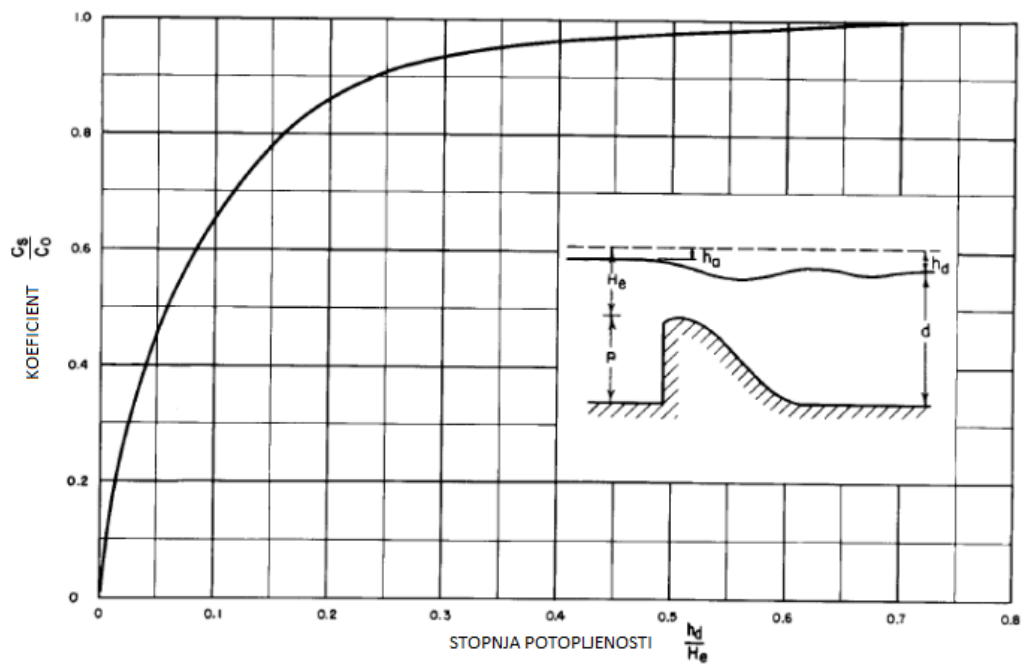


Diagram 5: Razmerje med koeficienti izpusta zaradi previsoke vode dolvodno

### 3.7.2 Široki prag

Pretok čez široki prag se bo zgodil ob kritični globini za idealni pretok. Za izračun pretoka se lahko uporabi kontinuitetno enačbo. Kot tudi drugod je tudi za prag kvadratne oblike, Froudevo število pri minimalni energiji (kritični globini), enako ena.

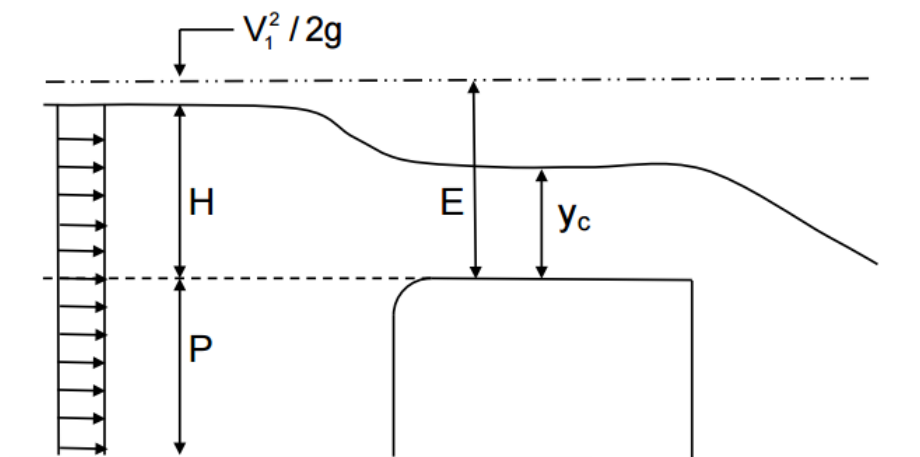
$$F_R = 1 = \frac{V_c}{\sqrt{gy_c}}$$

Kjer je:

$V_c$  hitrost vodnega toka

$\sqrt{gy_c}$  hitrost širjenja valov





Slika 17: Preliv čez prag

Iz enačbe  $Q = V_c y_c L$  dobimo

$$Q = L y_c \sqrt{g y_c}$$

Za pridobitev minimalne energije je kritična globina enaka  $2/3 H$

$$Q = L \sqrt{g} \left( \frac{2}{3} H \right)^{3/2} = 3,089 L H^{3/2}$$

Posplošena oblika za široki prag je:

$$Q = C L H^{3/2}$$

### 3.7.3 Koeficient preliva

Pretočni koeficient preliva dobimo, če pomnožimo popravni koeficient, ki zajame vpliv dotočne hitrosti in koeficient kontrakcije. Popravni koeficient  $\varphi$  je razmerje med prelivno višino  $h_{pr}$  in vrednostjo energije  $E$ . Pri dovolj majhnih dotočnih hitrosti znaša  $\varphi = 0,96$  do  $0,998$ .

$$\varphi = \varphi \left( \frac{h_{pr}}{E} \right)$$

Zaradi vztrajnosti tekočina ne more slediti ostremu robu prelivne stene. Pojavi se kontrakcija. Koeficient kontrakcije je razmerje med dejanskim ali efektnim prerezom  $S_{\text{efekt}}$  prelivnega curka in fiktivnim prerezom  $S_{\text{pr}}$ .

$$\sigma = \frac{S_{\text{efekt}}}{S_{\text{pr}}}$$

Tako dobimo pretočni koeficient preliva  $\mu$ :

$$\mu = \varphi * \sigma$$

S pomočjo praga lahko stabiliziramo niveleto dna struge. V niveleti dna, se zaradi preventive posedanja rečne struge, zgradijo talni pragovi. Največkrat so narejeni iz lomljenca ali iz lesenih brun, lahko so kamniti ali iz gabionov. Pri vzdolžnem padcu si prav tako lahko pomagamo z pragovi (stopnje), ki se po višini razlikujejo od 20 cm do 2 m. Hidravlični izračuni določajo pravilne dimenzije praga/stopnje in podslapja od njem/njej (Mikoš et al., 2000).

## 4 HEC-RAS

HEC – RAS (Hydrological Engineering Centers River Analysis System) je računalniški program, ki omogoča popolno analizo vodotokov pod različnimi pogoji. S programom, ki ga je zasnovala skupina raziskovalcev pod okriljem ameriške vojske, lahko računamo enodimenzionalne modele enakomernega in neenakomernega pretoka.

HEC-RAS je računalniški program, ki omogoča izvedbo:

- hidravličnega računa stalnega toka,
- hidravlični račun nestalnega toka,
- izračun transporta plavin,
- analiziramo lahko vpliv različnih objektov, kot so mostovi, nasipi in drugo,
- modeliramo lahko tudi nekatere parametre kvalitete vode,
- modeliranje temperature vode.

Rezultati nam pokažejo razmere v posameznih prečnih prerezih, krivulje pretokov, energijske izgube, nivoje rečne gladine. Na voljo so nam grafični in tabelarni rezultati, shema rečnega korita, hidrogrami in tridimenzijski prikaz rečnega korita.

Program za računanje hidravličnih lastnosti v vodotokih uporablja energijsko enačbo. Ker v energijsko enačbo niso vključeni časovno spremenljivi členi, je tok predpostavljen kot stalen (Mikoš et.al, 1998).

Energijska enačba enačba:

$$\alpha_1 x \frac{(Q/A_1)^2}{2 x g} + y_1 + z_{01} = \alpha_2 x \frac{(Q/A_2)^2}{2 x g} + y_2 + z_{02} + L_f + L_e$$

Kjer je:

$\alpha$  Coriolisov koeficient

Q pretok [m<sup>3</sup>/s]

A površina prereza [m<sup>2</sup>]

g težnostni pospešek [m/s<sup>2</sup>]

y globina vode [m]

z<sub>0</sub> kota dna [m n.m.v.]

- Lf trenjske izgube
- Le izgube zaradi zožitve ali razširitve v prečnem prerezu
- 1, 2 oznaka prečnega profila.

Enačba trenjskih oz. linijskih energijskih izgub (US Army Corps of Engineers, 2010):

$$L_f = (x_1 - x_2) \times S_f = (x_2 - x_1) \times \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$$

Kjer je:

- x stacionaža
- S<sub>f</sub> povprečen padec energijske črte med profiloma [m/m]
- Q pretok [m<sup>3</sup>/s]
- K prevodnost [m<sup>3</sup>/s]
- Lf trenjske izgube

Prevodnost K se izračuna po enačbi (US Army Corps of Engineers, 2010):

$$K = \frac{1}{n_g} \times A \times R^{2/3} = \frac{Q}{\sqrt{S_0}}$$

Kjer je:

- n<sub>g</sub> Manningov koeficient hrapavosti
- A površina prečnega prereza
- R hidravlični radij [m]
- Q pretok [m<sup>3</sup>/s]
- S<sub>0</sub> padec dna [m/m]

Izgube zaradi zožitve ali razširitve se računajo po:

$$L_e = C \times \frac{|v_1^2 - v_2^2|}{2 \times g}$$

Kjer je:

C koeficient zožitve ali razširitve

v hitrost [m/s]

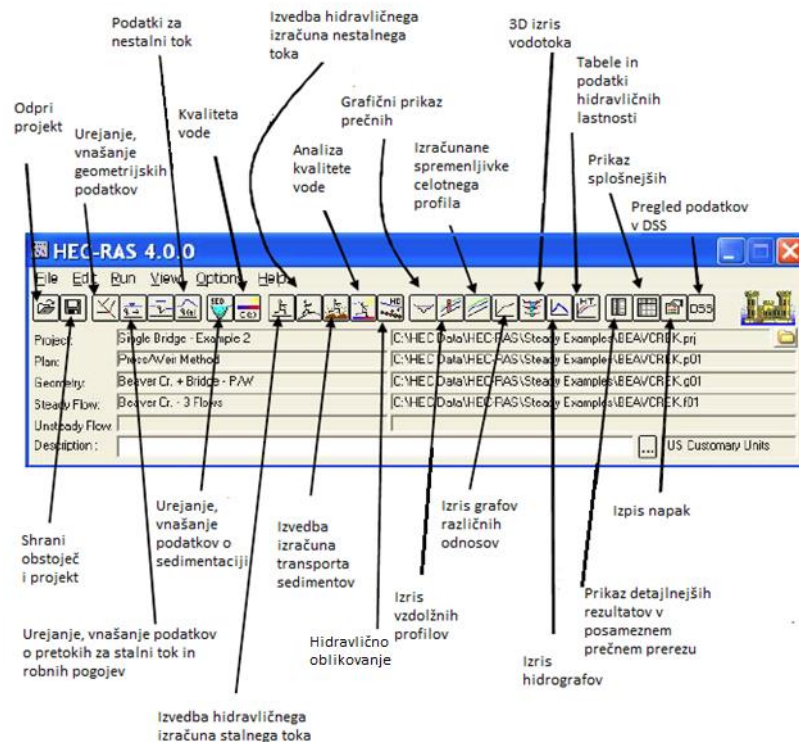
g težnostni pospešek [m/s<sup>2</sup>]

Le izgube zaradi zožitve ali razširitve v prečnem prerezu

#### **4.1 Koraki oblikovanja hidravličnega modela**

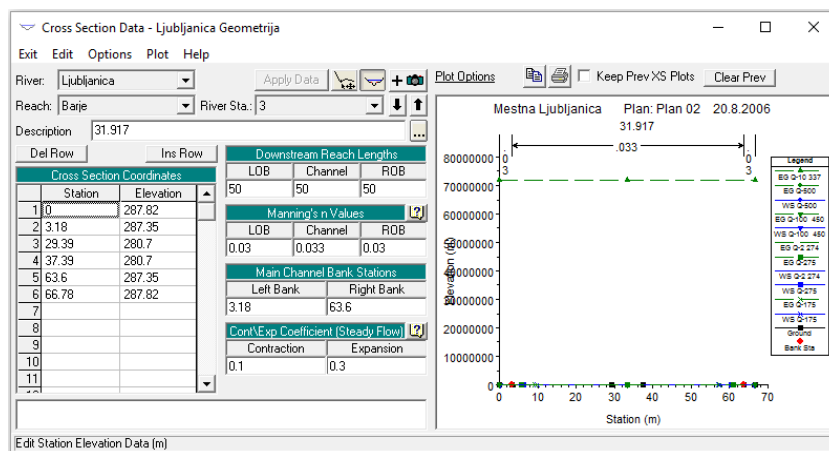
Pri programu HEC-RAS obstaja 5 glavnih korakov pri oblikovanju hidravličnega modela:

- začetek novega projekta, kjer se določijo ime novega projekta, direktorij shranjevanja in vse nastavitve, ki jih bomo pri delu s projektom potrebovali,



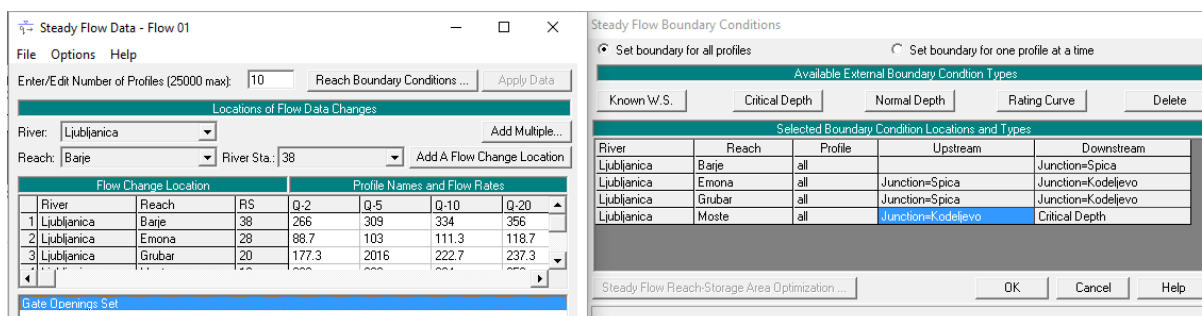
Slika 18: Glavno okno HEC-RAS (US army corps of engineers, 2010)

- vnosi geometrijskih podatkov,
  - najprej je potrebno vnesti shemo vodotoka,
  - nato je potrebno vnesti podatke o prečnih profili,



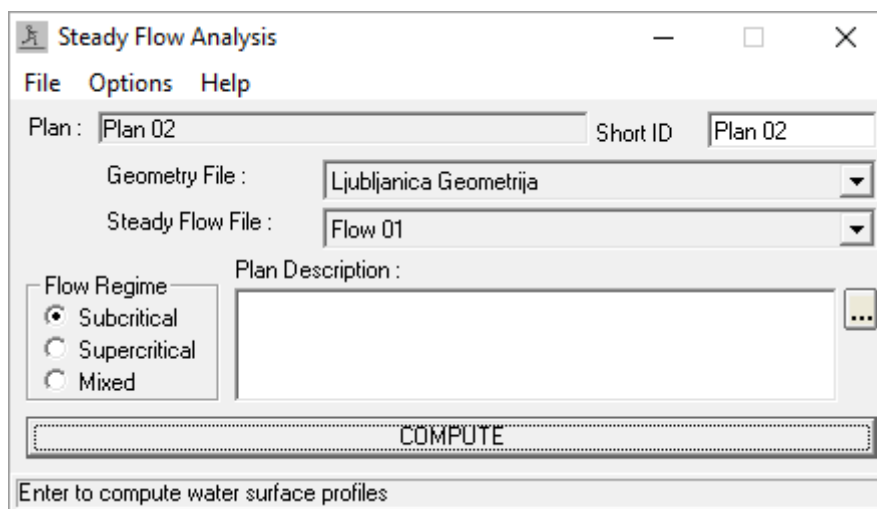
Slika 19: Podatki o prečnih profilih (US army corps of engineers, 2010)

- vnesti je potrebno tudi podatke o hidravličnih objektih.
  - mostovi, zapornice...
- naslednji korak je vnos podatkov o pretokih voda in robnih pogojih,



Slika 20: Podatki stalnega toka in robnih pogojev (US army corps of engineers, 2010)

- 4. korak je izvedba hidravličnih izračunov,



Slika 21: Podatki stalnega toka in robnih pogojev (US army corps of engineers, 2010)

- zadnji korak pa je izpis in ogled rezultatov, kjer si lahko ogledamo prečne prereze, vzdolžne prereze, pretočne krivulje, 3D pogled, podrobne tabelarične izpise za posamezni prečni prerez, splošne tabelarične izpise za celotne odseke vodotoka, lahko pa si sami oblikujemo izhodno tabelo.

## 5 UKREPI

Slovenija je poleg sprememb zakona o vodah, kjer je opredelila izdelavo podrobnejšega načrta zmanjševanja ogroženosti proti poplavami, skladno z evropsko Poplavno direktivo, sprejela Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ki so ogrožena zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanju zemljišč v razrede ogroženosti. Sprejeta je bila Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in erozije celinskih voda in morja. Načrtovati je potrebno celovite ukrepe za zmanjšanje ogroženosti, kjer pa še elementov ogroženosti ni, pa je potrebno načrtovati omilitvene ukrepe. Ti ukrepi so varovalne narave (zmanjšanje stopnje ogroženosti), varstvene (zmanjšanje stopnje ogroženosti pred onesnaženjem) in izravnalne narave (za izravnavo vpliva načrtovanega posega).

Cilj upravljanja z vodami je doseganje dobrega stanja voda in drugih, z vodami povezanih ekosistemov, zagotavljanje varstva pred škodljivim delovanjem voda, ohranjanje in uravnavanje vodnih količin in spodbujanje trajnostne rabe voda, ki omogoča različne vrste rabe voda ob upoštevanju dolgoročnega varstva razpoložljivih vodnih virov in njihove kakovosti (Zakon o vodah).

Pogoji in omejitve iz te uredbe so namenjeni za zmanjševanje poplavne in erozijske ogroženosti prebivalcev, gospodarskih dejavnosti in kulturne dediščine, v skladu s predpisi o vodah in s predpisi o varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami. Ohranitvi vodnega in obvodnega prostora, potrebnega za poplavne in erozijske procese in zagotavljanju okoljskih ciljev na območjih poplav in erozije v skladu s predpisi o varstvu okolja in s predpisi o vodah (89. Uradni list RS, št. 89/2008, z dne 19. 9. 2008).

Da se omeji število in razsežnost poplav so potrebni ukrepi kot so (Benedičič, 2010):

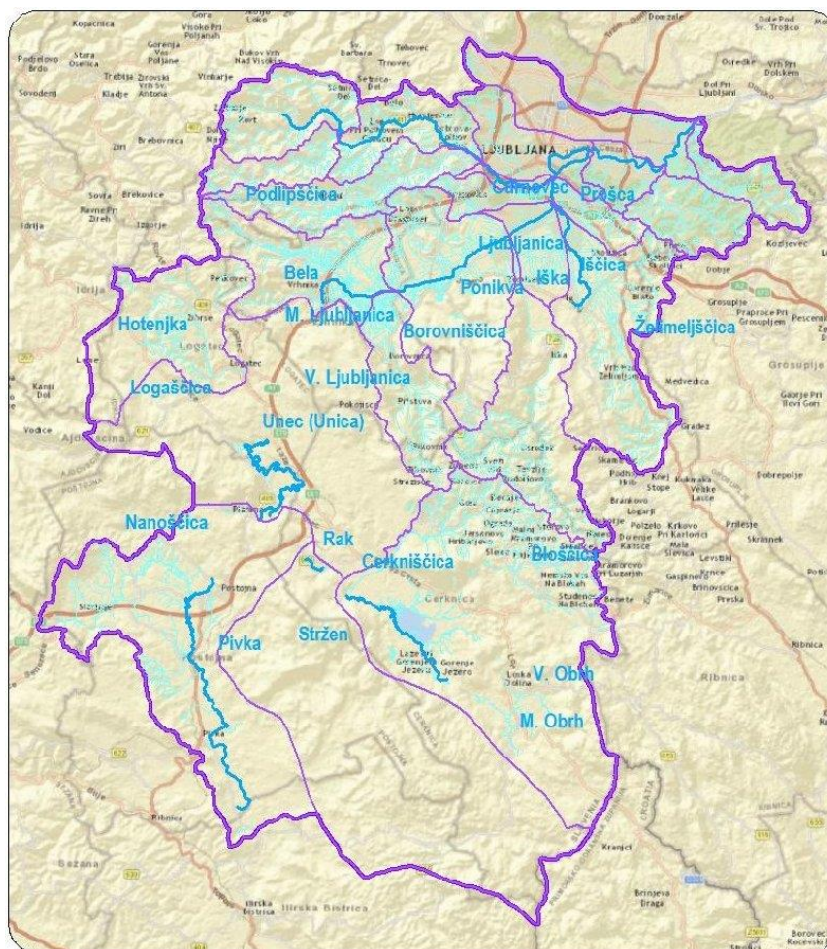
- redno vzdrževanje vodotokov,
- čiščenje strug,
- odstranjevanje plavin z mostih opornikov,
- odstranjevanje zarasti,
- urejanje in utrjevanje brežin,
- gradnja zadrževalnikov na območjih, ki so višje ležeči,
- gradnja nasipov,
- poglobljanje struge,
- gradnja poplavnih območij, ki imajo minimalni poseg v naravo, v suhih obdobjih so lahko to pašniki, travniki, ob poplavah nudijo prostor za razlitje vode,
- postavitve avtomatskih vodomernih in padavinskih postaj,



- analize, meritve, obveščanje,
- ...

## 6 LJUBLJANICA

Ljubljanica je reka v južnem delu Ljubljanske kotline. Izvira v bližini Vrhnike, prečka Ljubljansko barje, teče skozi Ljubljano in se pri naselju Podgrad izliva v reko Savo. Je zelo vodnata, saj zbira vodo z 1884 km<sup>2</sup> površine. Porečje ima predvsem kraški značaj. Pri poplavah se vode zadržujejo na kraških poljih in ne odteka tako hitro. Ob suši, ko voda odteče in se kraška polja presušijo, pa postanejo nizki pretoki zelo majhni.



Slika 22: Karta vodozbirnega območja Ljubljanice (<http://ksh.fgg.uni-lj.si/>)

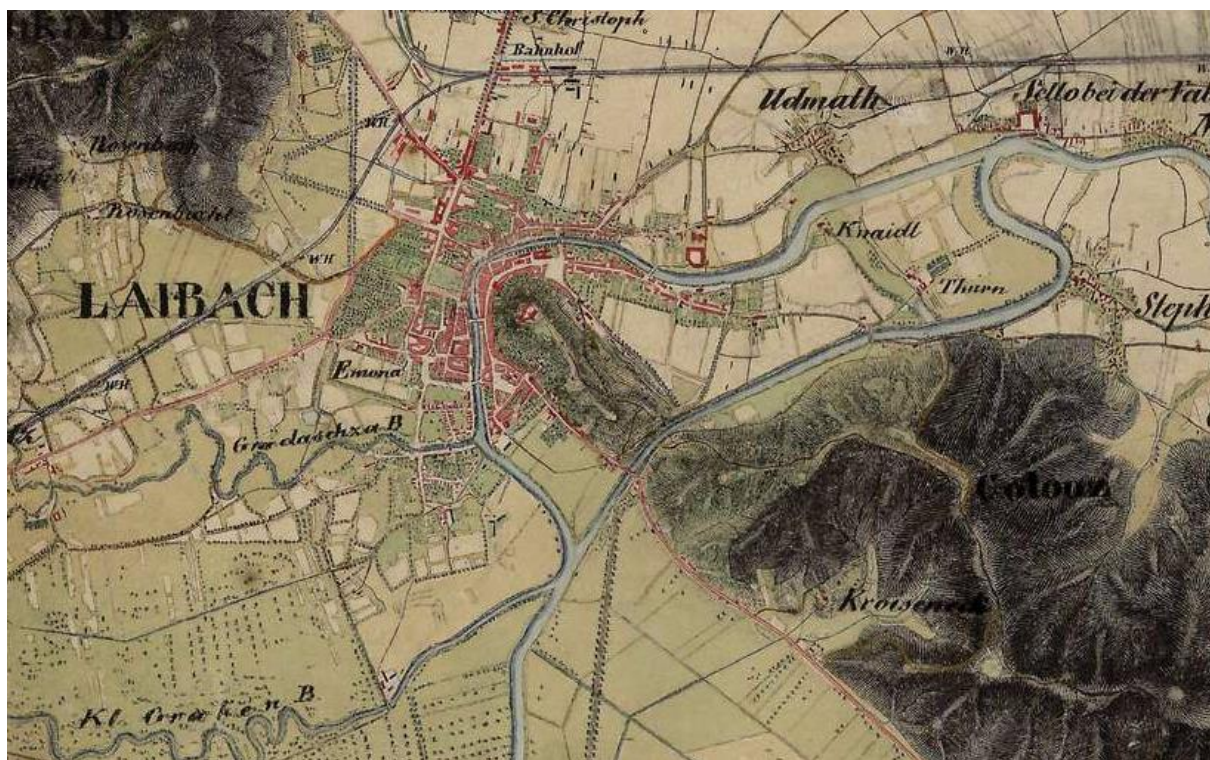
Na območju mestne občine Ljubljane je zaradi poplav ogroženih okoli 8000 ha površin, od tega preko 400 ha urbanih. In sicer največ na jugozahodnem delu, kjer poplavljata hudourniški potok Mali Graben in reka Ljubljanica s pritoki. Hudourniške poplave se začno zelo hitro in po kratkem času tudi upadejo. Zanje je značilna velika rušilna moč, erozija in močno nasipanje materiala. Na območju Mestne občine Ljubljane je hudourniški vodotok reke Gradaščice največji in tudi najnevarnejši.

Odtok z Ljubljanskega barja je pogojen z naklonom dna Mestne Ljubljane in Gruberjevega prekopa. Padec obeh krakov Ljubljane skozi mesto je bistveno večji, kot padec Ljubljane na Ljubljanskem barju.

## 6.1 Gruberjev kanal

Zaradi poplav Ljubljane v središču mesta so med letoma 1772 in 1780 v ožini med Grajskim gričem in Golovcem izkopal in utrdili Gruberjev prekop. Prekop je bila odlična protiukrep, saj je zmanjšal nevarnost vsakoletnih poplav na nizkih predelih Ljubljanskega barja. Bila je izboljšana protipoplavna varnost Ljubljane, osnovani pa so bili pogoji za dokončno ureditev Barja.

1840 so izravnali in poglobili staro strugo Ljubljane od Kodeljevega do Sela, ki je postala podaljšan Gruberjev kanal. V načrtu 1857 leta je bila predvidena poglobitev Ljubljane in Gruberjevega kanala, porušitev še ostalih jezov in mlinov na Ljubljani ter izvedbo še nekaterih večjih osuševalnih prekopov. Dela so bila končana leta 1867 in istega leta je bil še zgrajen sedanji Karlovski most.



Slika 23: Ljubljana leta 1857 (<http://mapire.eu/en/>)

Odtok z Barja je določen z višinsko lego struge Mestne Ljubljane, Gruberjevega prekopa in razpoložljivimi padci Ljubljanskega barja. Poplave na Ljubljanskem barju ob redkih poplavah, kot sta

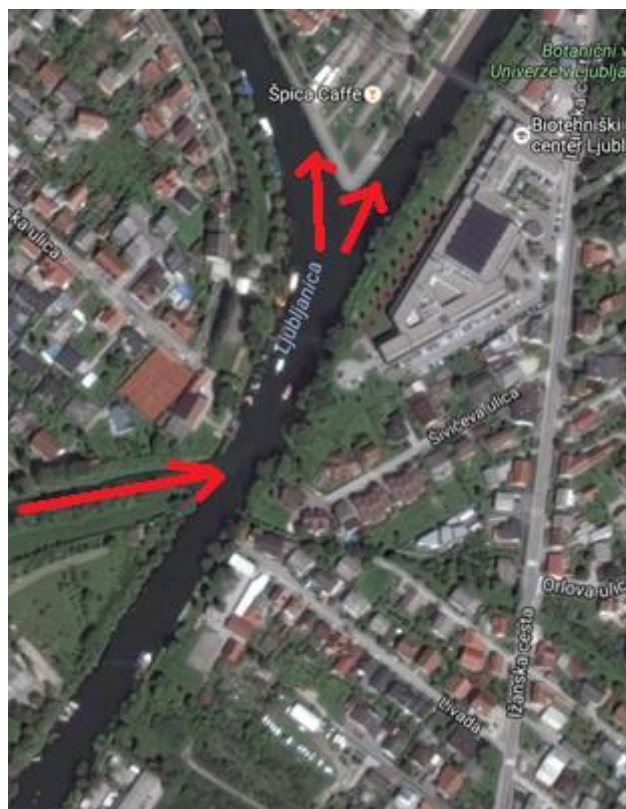
bili leta 1933 in 2010, dosežejo prostornino več kot  $25 * 106 \text{ m}^3$  (Ljubljansko barje; Hidrologija in analiza poplavnosti, VGI, 1984). Ob poplavnih dogodkih na Barju odteka po Ljubljani skozi Ljubljano približno 50 % dotokov na Ljubljansko barje. Med poplavo leta 1933 je na Ljubljansko barje dotekalo  $790 \text{ m}^3/\text{s}$ , skozi Ljubljano pa odtekalo  $372 \text{ m}^3/\text{s}$ . Razlika med dotokom in odtokom se zadrži na Ljubljanskem barju (Ljubljansko barje; Hidrologija in analiza poplavnosti, VGI, 1984). Ob posameznih poplavnih dogodkih prostornine poplavnih valov presegajo  $100 * 106 \text{ m}^3$ . Ljubljansko barje deluje kot največji naravni zadrževalnik na slovenskem ozemlju in je ključnega pomena za vodni režim Ljubljane in Save. Kot naravni zadrževalniki delujejo že kraška polja (planinsko, pivško, cerkniško).

Z razvojem se je Ljubljana postopoma širila na območja občasnih poplav Save, Ljubljane in pritokov. Vzporedno z razvojem je bil ključnega pomena projekt za izboljšanje poplavne varnosti in izgradnja Gruberjevega prekopa med Golovcem in grajskim hribom v letih 1772 in 1782. Ta je bistveno spremenila razmere na južnem delu Ljubljane.

Projekt izgradnje Gruberjevega prekopa je bil nujen, saj je bilo neskončno poglobljanje struge Ljubljane nemogoče.

Gruberjev kanal deluje kot razbremenilni kanal Ljubljane. Prevodnost vode tu in Ljubljane skozi mesto ne omogoča zadostne varnosti pred poplavljanjem naselij na Ljubljanskem barju. Zato bi bilo treba prevodnost obeh strug čim bolj povečati in se izogniti kakršnim koli ukrepom, ki prevodnost zmanjšujejo.

Sem sodijo tudi pristani in plovila, ki so bila v zadnjih letih umeščena na Gruberjev prekop. Obstaja nevarnost, da se plovila ob oteženem manevriranju, predvsem v času povečanih pretokov in pretočnih hitrosti, v strugi zagodijo ob mostne opornike Karlovškega mostu ali ob zapornicah na Gruberjevem prekoku. Prevodnost struge bi zmanjšala tudi postavitve pontonov. Vsi ti vplivi pa imajo lahko potencialno velik vpliv na poslabšanje poplavne situacije.



Slika 24: Puščice označujejo nanos plavja v pontone in odlagališče plavin Malega Grabna  
([www.google.com/maps](http://www.google.com/maps))



Slika 25: Na ljubljanski Špici odprtje novih pristanov v Gruberjevem kanalu ([www.zurnal24.si](http://www.zurnal24.si))

## 6.2 Poplave septembra 2010

Med največje tri poplave spadajo tudi poplave septembra leta 2010. Močne padavine, ki so potekale med petkom 17.9.2010 in nedeljo 19.9.2010 so bile vzrok obsežnih poplav. Barje je začelo poplavljeni v soboto popoldne, ko so se napolnile podzemne vodne kraškega zaledja. Poplave so povzročile vode, ki so istočasno začele pritekati iz izvirov ob vznožju Krimskega pogorja okoli 11ih dopoldan. Iška, Iščica in Ljubljana s svojimi pritoki z zahodnega dela Ljubljanskega barja, pa so začele poplavljeni v soboto popoldan. Največji obseg so poplave imele v ponedeljek, 20.9.2010 (Globevnik et al., 2010).

Hidrološke merske postaje v Mostah na Ljubljanci in v Iški vasi na Iški (ARSO postaje) so pokazale, da je imela Iška tri kratke poplavne valove s konicami 49.3 m<sup>3</sup>/s (18.9.2010 zjutraj) in 59.3 m<sup>3</sup>/s (19.9.2010 ponoči in zjutraj), Ljubljana pa enega z vrhom v nedeljo (19.9.2010, 353 m<sup>3</sup>/s) med 11:30 in 15.30. Pretoki na Ljubljanci so se zniževali počasi, medtem ko je imela Iška značilen hudourniški značaj. Volumen poplavnega vala Iške med 18.9.2010 in 20.9.2010 je bil 7,15 mio m<sup>3</sup>. Volumen odtekle vode v Ljubljanci po 12 ih dnevih (brez upoštevanja dodatnega dviga gladine 25.9.2010) je bil 270 mio m<sup>3</sup>. Koeficient odtoka padavin med 17.9.210 in 19.9.2010 je bil 0.65 (Globevnik et al., 2010).

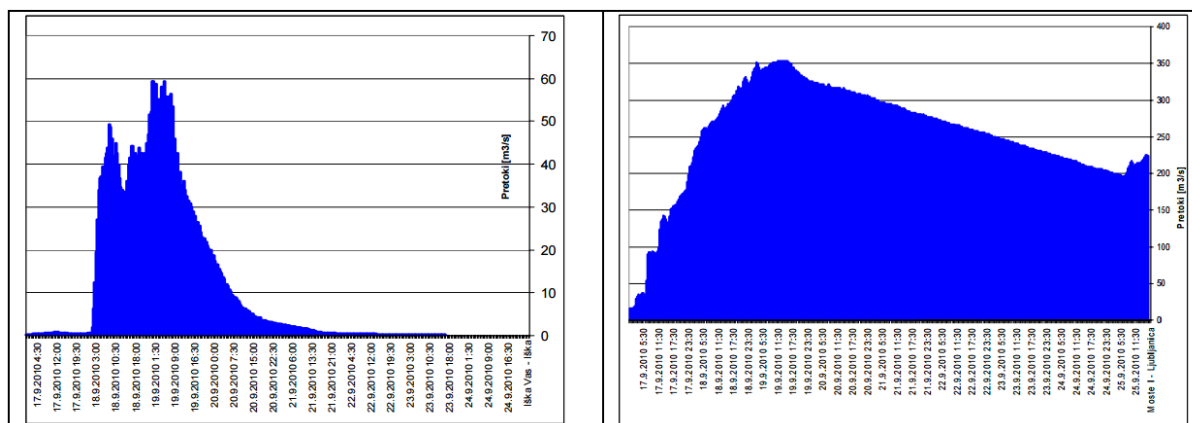


Diagram 6: Pretoki leta 2010 (Arso, 2011)

Poplave na Ljubljanskem barju, ki so se zgodile v septembru 2010, so imele verjetnost nastopa 1%. Poplavljenih je bilo 76,8 km<sup>2</sup> površin, prostornina vode je bila 34 mio m<sup>3</sup>. Obstoječe površine torej nudijo ustrezno prostornino za zadrževanje stoletnih visokih in poplavnih voda, ki nastanejo pri odtočnih koeficientih večjih od 0.65. Nadaljnje množične pozidave in nasutja bi predstavljala zelo velika tveganja za povečanje ogroženosti prebivalcev Barja in Ljubljane (Globevnik, Vidmar, 2010).

### 6.3 Zapornice

Na Ljubljani sta bili zgrajeni dve zapornici. Ti dve zapornici urejata potreben nivo gladine na Barju. Ena je na Grubarjevem prekopu, druga pa na Ambroževem trgu.

Leta 1912 je bila na Grubarjevem prekopu zgrajena zapornica, v začetku tridesetih let pa so se začela obširnejša dela na mestni Ljubljani. To so bile izgradnje mostov, poglobitev struge, tlakovanje in betoniranje dna, obrežna zavarovanja.

Ta zapornica zadržuje gladino vode na koti 285.60 m n. v. Zapornica je dvodelna tablasta. Nahaja se približno 420 m dolvodno od Karlovškega mosta. Geološke razmere v okolici so dovolj ugodne, da je temeljenje zapornice izvedeno na konglomeratu. Padec dna struge Gruberjevega kana pa znaša med 1.0 in 1.2 ‰.

Zapornica je sestavljena iz praga, dveh stranskih opornikov in vmesnega stebra. Svetla odprtina, kjer se pretaka voda znaša 2\*11.10 m. Za oskrbo zapornic služi pokrito mostišče z dvigalnimi napravami. Zaradi same višine table ne moremo uravnati višino vodne gladine. Uravnavanje je možno samo z iztokom izpod zapornice. Spuščanje in dvigovanje zapornic je počasen postopek saj je za celoten dvig zapornice potreben čas 1,5 ure. Zapornica je slabo informacijsko opremljena, nima pa tudi potrebne dovozne poti.

Leta 1944 pa se je po veliki poplavi na Barju in zahtevah Barjanov ter odločitvi gradbenega vodstva glede prejšnjih izkušenj sprejelo, da se pusti zapornico na Grubarjevem kanalu odprto, saj se bo tako tudi odtočni nivo reke Ljubljane trajno znižal.



Slika 26: Zapornice na Gruberjevem kanalu (<http://mapio.net/o/5785324/>)

Na Ambroževem trgu znaša padec struge 0,7 %. Kakor zapornica na Gruberjevem prekopu je tudi na Ambroževem trgu dvodelna tablasta. Nahaja se dolvodno od Šempeterskega mostu. Sestoji iz praga, vmesnega stebra in dveh stranskih opornikov. Odprtina med stebroma znaša  $2 \times 12,45$  m. Z zapornicami rokuje zaporničar, ki sam presoja o odpiranju zapornic glede na stanje vodotoka gorvodno.

Zapornice na Ljubljanici so nepremostljive ovire za plovbo, ki bi po nekaterih načrtih potekala krožno po strugi Ljubljanice in Grubarjevega kanala. Za premagovanje višinske razlike, ki nastane med obema nivojema gladin pri zapornicah bi morala biti zgrajena splavnica.

#### **6.4 Karlovški most**

Z gradnjo Gruberjevega kanala, so prekinili Karlovško cesto. Zato je bila na cesti, ki je vodila iz mesta skozi Karlovška vrata, potrebna izgradnja Karlovškega mostu. Ta premošča Gruberjevo nabrežje, Gruberjev kanal in Ižansko cesto.

Prva izvedba mostu je bila lesena. Tega so leta 1864 nadomestili z enim srednjim kamnitim opornikom.

Ker se je promet povečeval, so leta 1938 leta most razširili za 1,12 m na vsako stran, leta 1976 pa gorvodno zgradili novega, ki je brez mostnih opornikov v sami strugi.



Dolžina premostitve novega Karlovškega mostu znaša 87,25 m in poteka preko dveh ožjih stranskih poljih in srednjem daljšem, ki stoji nad reko Ljubljanico.



Slika 27: Stari Karlovški most

([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karlov%C5%A1ki\\_most\\_stari\\_\(4\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karlov%C5%A1ki_most_stari_(4).JPG))

## 7 HIDRAVLIČNA ANALIZA OBRAVNAVANEGA ODSEKA

Obravnava odsek poteka od Barja do Most. Na jugu dobi Ljubljanica pritok Mali graben, nato pa se pri Špici struga razdeli na dve trasi. Severna gre skozi mesto Ljubljana, kjer Ljubljanica teče skozi umetno poglabljeno strugo. Južna trasa pa gre po obrobju Ljubljane po umetno izkopani strugi Gruberjevega prekopa.

Obe trasi se združita na Kodeljevem. Naprej teče Ljubljanica do Podgrada, kjer se izlije v Savo.

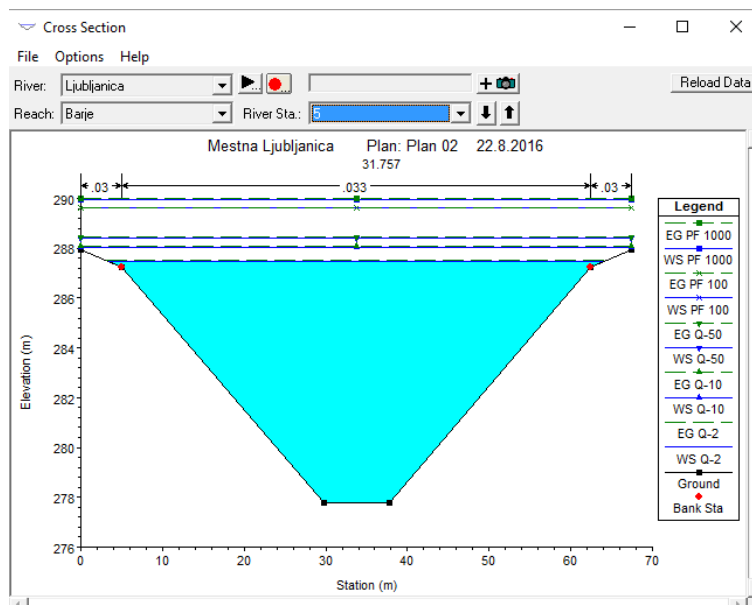


Slika 28: Obravnavan odsek ([www.google.com/maps](http://www.google.com/maps))

### 7.1 Geometrija struge

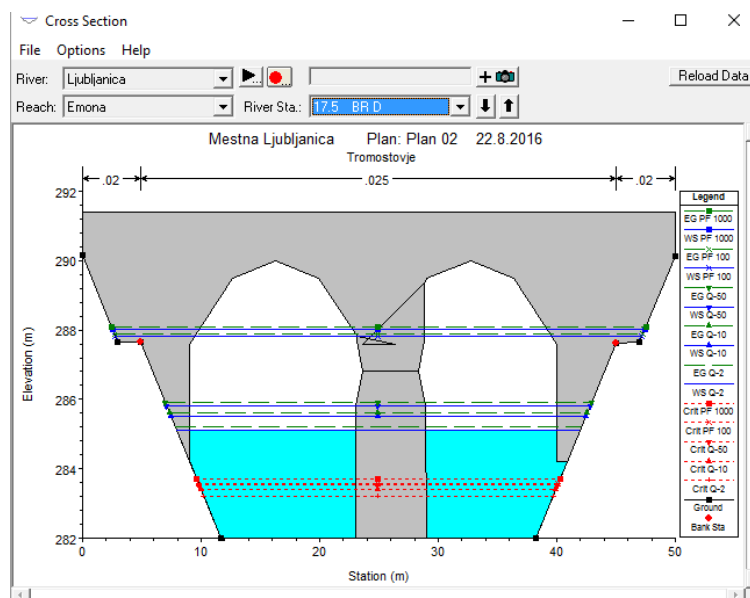
Geometrija struge je bila izbrana s 110 prečnimi profili.

- odsek Barje ima 38 prečnih profilov, struga je bila v preteklosti zregulirana, dejanska geometrijska oblika struge je precej naravna,
  - prikazan prečni prerez za odsek Barja je prerez št. 5. Širina rečnega dna je 8m, širina struge pri pretoku  $266 \text{ m}^3/\text{s}$  je 56,26 m, globina rečnega dna je 9,25 m, hitrost pretoka 0,90 m/s,
  - struga Ljubljane na Barju je ena najglobljih v Sloveniji (globine v geometriji struge upoštevane v hidravličnem modelu so od 5 m do 11 m).



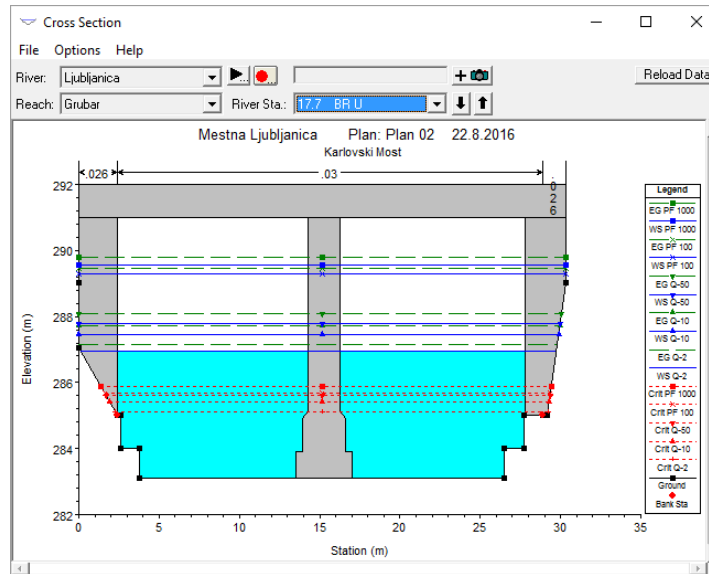
Slika 29: Primer prečnega prereza na odseku Barje, št. 5

- prečni prerez na odseku mestne Ljubljane ima 33 prečnih profilov,
  - na sliki je prikazan prečni prerez št. 17, prerez kjer se nahaja tromostovje. Širina rečnega dna je 26 m, širina struge 36,87 m. Hitrost toka vode pri pretoku 177,30 m<sup>3</sup>/s je 1,30 m/s, globina rečnega kanala pa je 4,29m.



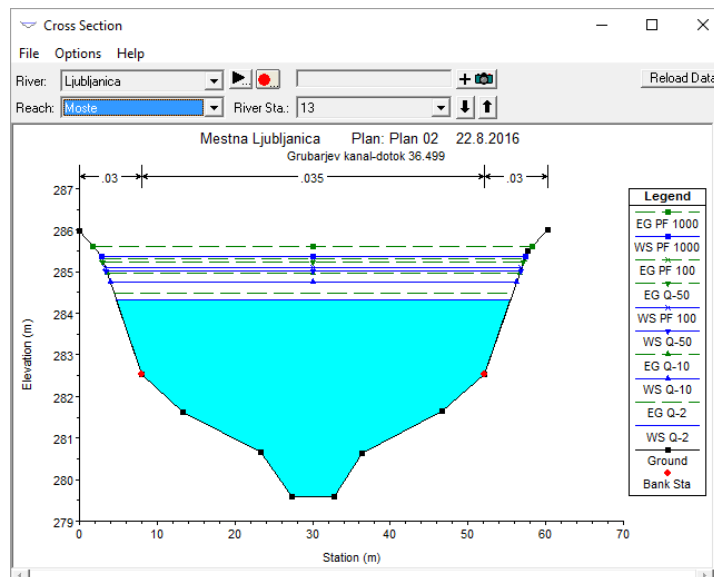
Slika 30: Primer prečnega prereza na odseku mestne Ljubljane, Tromostovje

- odsek Grubar ima 24 prečnih profilov,
  - na sliki je prerez 17, Karlovški most. Širina rečnega dna je 22 m, širina rečne struge pri pretoku 88,70 m<sup>3</sup>/s je 26 m, povprečna globina pa 3,25 m.



Slika 31: Primer prečnega prereza na odseku Gruberjevega prekopa, Karlovški most

- odsek Moste ima 13 prečnih profilov.
  - na sliki je profil št. 13. Širina rečnega dna meri 6m, širina rečne struge je 50,74 m, povprečna globina pri pretoku  $266 \text{ m}^3/\text{s}$  pa je 4,74 m.



Slika 32: Primer prečnega prereza na odseku Moste

## 7.2 Objekti

Čez Ljubljano gredo 3 mostovi in sicer v prečnih profilih 20.8, 17.5 in pa v prečnem profilu 17.7.

- most na prečnem profilu 20.8 je Čevljarski ali Šušarski most. Plečnik je ob začetku 30 let prejšnjega stoletja narisal načrt za nov betonski most. Dolg je 27,30 m. Poteka preko dveh ožjih stranskih poljih dolgih 11,20m, na sredini pa je podprt z sredinskim nosilcem. Širina vozišča je 7 m z obojestranskima pločnikoma po 1,975 m.



Slika 33: Čevljarski most (<https://sl.wikipedia.org/wiki>)

- most na profilu 17.5 je Tromostovje. Srednji most je sestavljen iz dveh lokov s srednjim opornikom. Stranska polja sta široka 11,30 m in 11,20 m. Prečni prerez mostu meri 10 m in je namenjen peščem, motornemu prometu in tramvaju.



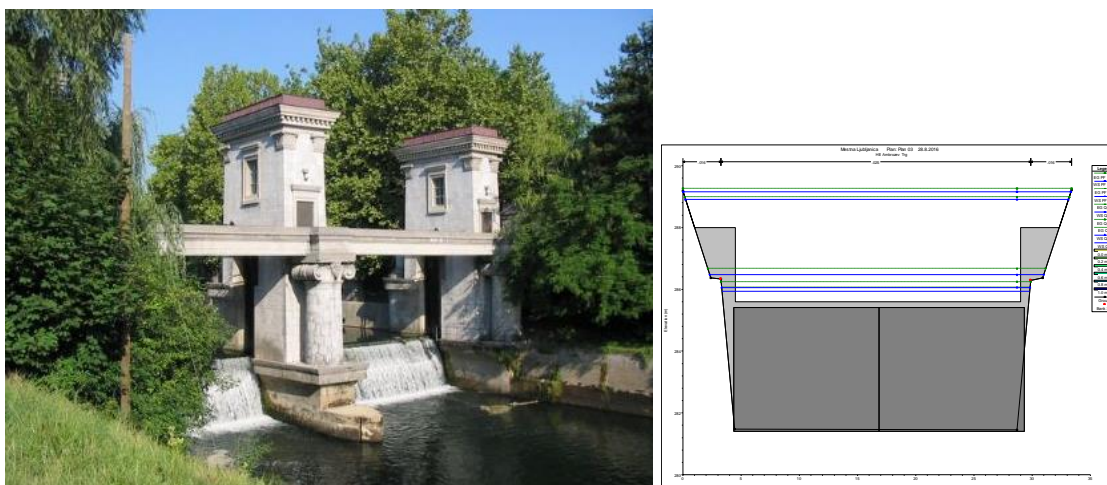
Slika 34: Tromostovje (<https://sl.wikipedia.org>)

- most na profilu 17.7 je stari Karlovški most. Leva najmanjša svetla odprtina je dolga 9,7 m, desna pa 9,5 m.



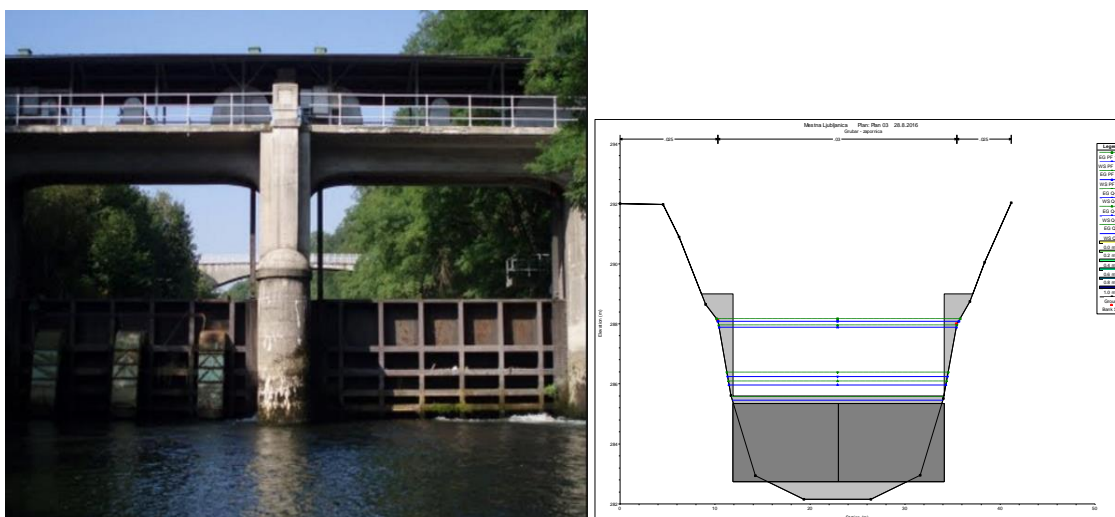
Slika 35: Stari Karlovški most (<https://sl.wikipedia.org>)

- v modelu so tudi dve zapornici, ki so pomembne za računski model
  - zapornica na Ambroževem trgu,



Slika 36: Zapornica na Ambroževem trgu (<http://www.pictureslovenia.com>)

- zapornica na Grubarjevem kanalu.



Slika 37: Zapornica na Grubarjevem prekopolu (<http://mapio.net/o/5785324/>)

### 7.3 Hidrološki podatki

Povratne dobe so bile izračunane za največje letne pretoke ( $Q_{vk}$ ) in najmanjše letne pretoke ( $Q_{np}$ ) Izračun je bil narejen za lokacije merilnih mest z nizom podatkov vsaj 10 let. Upoštevani so bili podatki do leta 2010. Za računanje povratnih dob so na Agenciji za okolje Republike Slovenije uporabili Pearson III in Log Pearson III porazdelitveni funkciji, ki sta v hidrološki praksi najpogosteje uporabljeni metodi. Spadata med troparametrsk Gama funkcije, katera izhaja iz eksponentne porazdelitve (Agencija Republike Slovenije za okolje, 2013).

V preglednicah so za vsako merilno mesto (vodomerno postajo), za letne visokovodne konice ( $Q_{vk}$ ) podani pretoki za povratne dobe 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 300, 500 in 1000 let, kar ustreza verjetnostim nastopa dogodka 0,5, 0,2, 0,1, 0,05, 0,033, 0,02, 0,01, 0,0033, 0,002 in 0,001 (Agencija Republike Slovenije za okolje, 2013). Z daljšimi obdobji meritev seboljšajo tudi ocene pretokov ta daljše povratne dobe.

Podatki za naše izračune so bili izmerjeni na vodomerni postaji Moste 1. Časovni interval podatkov je 65 let.

Šifra	Vodotok Postaja	F (km <sup>2</sup> )	Obdobje	Št. let	Porazdelitvena funkcija oz. vir	Q <sub>vk</sub> (m <sup>3</sup> /s) - POVRATNA DOBA (leta)										
						2	5	10	20	30	50	100	300	500	1000	
5030	LJUBLJANICA VRHNIKA		1926-2010	85	Pearson 3 Log Pearson 3 ZVO-R**	96,9 97,0	106 106	110 110	114 114	117 116	119 119	122 122	126 126	128 128	131 130	
5078	LJUBLJANICA MOSTE I	1762,32	1946-2010	65	Pearson 3 Log Pearson 3	266 265	309 308	334 334	356 356	368 369	382 384	401 403	428 433	440 446	458 464	
5240	LJUBLJA VERD		1952-2009	58	Pearson 3 Log Pearson 3	20,5 20,5	21,9 21,9	22,8 22,8	23,6 23,6	24,1 24,0	24,6 24,6	25,3 25,3	26,3 26,4	26,8 26,9	27,4 27,5	
5270	BISTRA BISTRA I		1970-2010	41	Pearson 3 Log Pearson 3	16,1 16,1	17,3 17,3	18,1 18,1	18,9 18,8	19,3 19,3	19,9 19,8	20,6 20,5	21,6 21,6	22,2 22,2	22,8 22,9	
5330	BOROVNIŠČICA BOROVNICA	34,89	1954-1993, 1999-2010	52	Pearson 3 Log Pearson 3 ZVO-VODAR***	22,8 22,9	30,5 31,0	34,9 35,3	38,7 38,8	40,7 40,5	43,1 42,4	46,2 44,7	50,7 47,7	55,2 48,9	55,2 50,4	
5425	ISKA	69,69	1970-2010	41	Pearson 3	34,2	59,2	78,9	94,1	104	116	133	158	170	186	
5441	IZICA IG I		1956, 1958, 1960, 2001- 2005, 2007, 2009-2010	11	Log Pearson 3 Log Pearson 3	33,4 15,6	55,8 20,6	74,4 23,5	95,3 26,0	109 27,4	128 28,9	156 31,0	209 33,8	238 35,1	281 36,7	
5479	GRADAŠČICA BOKALCE	154,43			ZVO-R**			134				234		360		
5480	GRADAŠČICA RAZORI	106,13	1955,1957, 1959-1982	26	Pearson 3 Log Pearson 3	53,1 52,4	63,8 64,1	69,1 70,2	73,5 75,2	75,7 77,8	78,3 80,7	81,4 84,3	85,8 89,1	87,6 91,1	89,9 93,6	
5500	GRADAŠČICA DVOH	78,67	1984-2010	27	Pearson 3 Log Pearson 3	39,6 42,2	51,0 52,5	59,6 58,5	68,3 63,9	73,3 66,7	79,7 70,2	88,3 74,7	102 81,3	108 84,2	116 88,1	
5540	SUJICA RAZORI*	46,88	1954-2010	57	Pearson 3 Log Pearson 3	17,3 17,4	22,8 22,8	26,3 26,2	29,6 29,3	31,4 31,0	33,6 33,1	36,5 36,0	40,9 40,3	42,9 42,3	45,5 45,1	
5580	VELIKI OBRH VRHNIKA		1961-1970, 1973-1975, 1981- 1985, 2004-2010	25	Pearson 3 Log Pearson 3	17,8 18,0	23,0 22,7	26,6 26,2	30,1 29,8	32,2 32,0	34,7 34,8	38,1 38,9	43,4 46,0	45,8 49,6	49,1 54,8	
5590	VELIKI OBRH PUDOB		1952-1986, 1988-1989	37	Pearson 3 Log Pearson 3	22,6 22,8	27,9 27,9	31,1 31,0	34,0 33,8	35,7 35,3	37,6 37,2	40,1 39,6	44,0 43,3	45,7 44,9	48,0 47,1	
5730	ZEROVNIŠČICA ZEROVNICA		1955-1970, 1972-1985	30	Pearson 3 Log Pearson 3	4,27 4,24	5,29 5,29	5,85 5,90	6,33 6,43	6,59 6,71	6,90 7,05	7,29 7,49	7,85 8,12	8,10 8,40	8,42 8,76	
5770	CERKNICA CERKNICA I	47,29	1954-1960, 1962-2010	56	Pearson 3 Log Pearson 3	23,9 23,1	34,6 33,7	41,4 41,3	47,6 49,1	51,1 53,8	55,3 59,8	60,9 68,4	69,3 82,9	73,0 90,1	78,1 100	
5800	PIVKA PRESTRANEK*		1958-2010	53	Pearson 3 Log Pearson 3	13,2 14,2	20,0 19,6	27,8 25,0	37,2 31,8	43,3 36,5	51,3 43,6	62,9 55,2	82,1 80,0	91,1 94,8	109 119	
5820	PIVKA POSTOJNSKA JAMA		1954-1986	33	Pearson 3 Log Pearson 3	51,0 50,6	59,0 59,0	63,1 63,6	66,5 67,5	68,2 69,6	70,2 71,9	72,7 74,9	76,2 79,2	77,7 81,0	79,6 83,3	
5840	NANOŠČICA MALI OTOK*	47,32	1970, 1972-1975, 1985, 1989- 2010	28	Pearson 3 Log Pearson 3	13,9 14,0	16,2 16,1	17,9 17,7	19,6 19,4	20,6 20,4	21,9 21,8	23,6 23,8	26,3 27,2	29,2 28,9	31,3	
5870	UNICA MOST V MALNE		1954-1970, 1972-1975	21	Pearson 3 Log Pearson 3	62,8 62,4	70,2 70,2	74,0 74,4	77,1 77,9	78,7 79,8	80,6 82,0	82,9 84,7	86,1 88,5	87,4 90,2	89,2 92,3	
5880	UNICA HASBERG		1926-2010	85	Pearson 3 Log Pearson 3	73,8 73,8	81,5 81,6	85,6 85,7	89,1 89,1	90,9 90,9	93,0 93,0	95,7 95,6	99,5 99,2	101 101	103 103	
5910	MALENŠČICA MALIN*		1961-1991, 1996-2010	46	Pearson 3 Log Pearson 3	9,69 9,68	10,2 10,2	10,5 10,5	10,8 10,8	11,0 11,0	11,2 11,2	11,4 11,4	11,9 11,9	12,1 12,1	12,3 12,3	
5930	HOTENJKA HOTEDRŠČICA		1954-1967, 1970, 1972-1985	29	Pearson 3 Log Pearson 3	5,07 5,40	10,9 10,0	15,8 14,3	21,0 19,6	24,2 23,3	28,2 27,4	33,7 32,4	42,4 42,4	46,5 46,5	51,8 51,8	
5940	LOGAŠČICA LOGATEC		1955-1966, 1970, 1972-1985	27	Pearson 3 Log Pearson 3 ZVO-R**	9,09 9,17	13,3 13,0	16,3 15,9	19,1 18,9	20,7 20,7	22,7 23,0	25,4 26,4	29,5 32,3	31,4 31,3	33,9 39,7	

\* cel niz enkrat dnevna opazovanja

\*\* ZVO-R (2012): IDZ, projekt BOBER  
\*\*\* ZVO-VODAR (2012): IDZ, projekt BOBER

Preglednica 4: Povratne dobe (Agencija Republike Slovenije za okolje, 2013)



## 7.4 Umerjanje modela

Posebno umerjanje hidravličnega modela v okviru diplomske naloge zaradi pomanjkanja terenskih podatkov ni bilo izvedeno. Predpostavljene so bile naslednje vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti, ki so bil predhodno upoštevani v številnih hidravličnih izračunih obravnavanega odseka Ljubljanice. Za umeritev hidravličnega modela je bilo izbranih več Manningov koeficientov ( $n_g$ ) in sicer na podlagi izkušenj.

Odsek	Vrednost Manningovega koeficienta
Barje	0,33
Mestna Ljubljanica	0,25
Gruberjev prekop	0,03
Moste	0,035

Preglednica 5: Vrednost Manningovega koeficienta na odsekih reke Ljubljanice

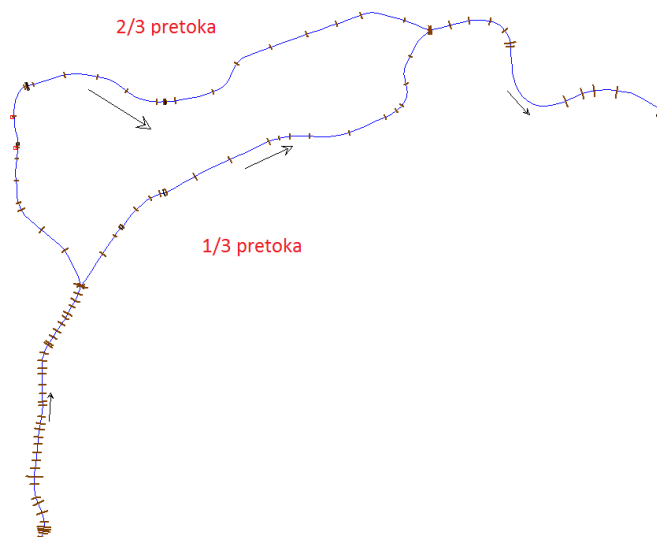
## 7.5 Robni pogoji

V programu HEC – RAS lahko simuliramo mirni, deroči in pa izmenjujoči se režim toka. Za diplomsko nalogo smo uporabili simulacijo mirnega toka. Tukaj so razmere gorvodno določene s stanjem na odseku dolvodno. Pomembna je natančna določitev spodnjih robnih pogojev.

Robni pogoji (Boundary Conditions) so nujno potrebi za začetek izračuna. Lahko jih začnemo vnašati takoj, ko smo končali z vnosom podatkov o pretokih.

Pri diplomski nalogi smo zaradi odsotnosti podatkov o gladinskih stanjih na terenu in zaradi neposredne bližine jezu v Fužinah, kjer se hidravlični model konča, kot robni pogoj upoštevali kritično globino.

Podatke na Preglednici 4 smo dobili v arhivih Agencije Republike Slovenije za okolje. Pretok na odseku Barje in Moste smo izenačili, nato pa na podlagi meritev, ki so bile že izvedene predpostavili, da gredo dve tretjini pretoka skozi mestno Ljubljano, ostala tretjina pa po Gruberju.



Slika 38: Razporeditev pretokov na obravnavanem odseku (Hec-Ras)

## 7.6 Simulacija programa

Po izpolnjenih prvih točkah zasnove hidravličnega modela, smo izvedli simulacijo stalnega toka in analizirali rezultate hidravličnih izračunov.

## 7.7 Rezultati

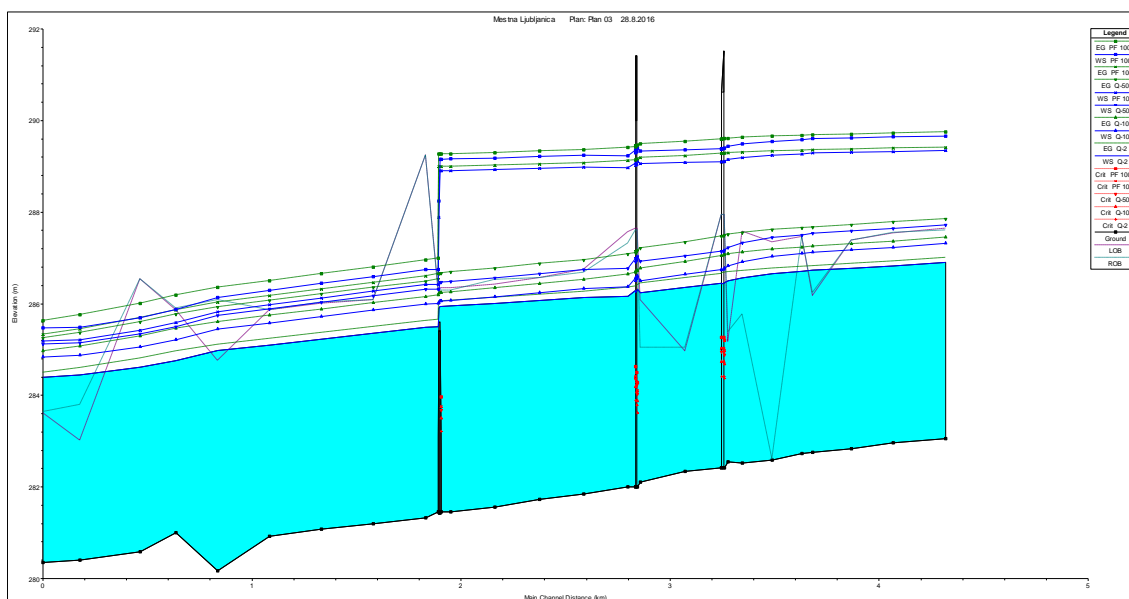
Izvedeni so bili izračuni stalnega mirnega toka. Zanimali so nas rezultati višin rečne gladine, hitrosti pretoka, strižne napetosti in pa primerjava rezultatov med odsekom mestne Ljubljane in Ljubljane, ki teče po Gruberjevem prekoku.

Višina rečne gladine je pomembna zaradi poplavljanja. Rezultati so nam v pomoč, kot možnost preprečitve novih poplav.

Hitrosti pretoka nam daje informacije o moči udarnega poplavnega vala in velikost pritiskov na strukture, ki predstavljajo oviro toku vode.

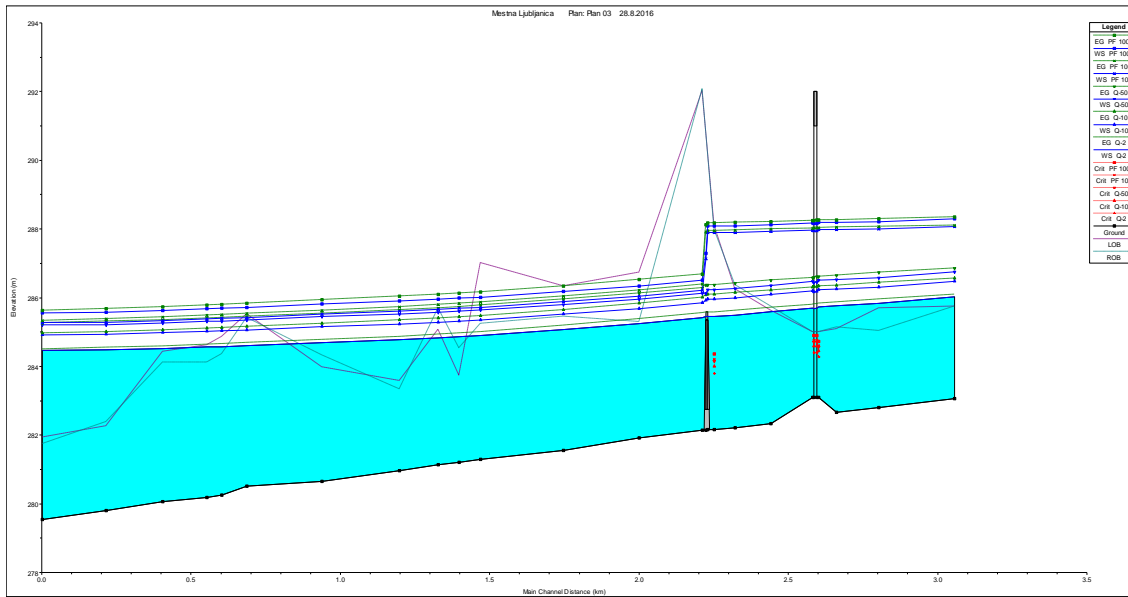
Pri toku vode v strugi deluje vlečna sila v smeri vodnega toka na dno in brežine struge. Strižna napetost  $\tau_R$  se izračuna kot razmerje med vlečno silo in omočenim obodom. Vlečna sila je obremenitev, ki deluje na strugo in povzroča prodonosnost (dejanski pretok rinjenjih plavin) (Mikoš, 2008). Strižna napetost je odvisna od naklona dna struge in pretočne globine vode, torej od pretoka vode  $Q$  (Mikoš, 2009).

### 7.7.1 Vzdolžni prerez



Slika 39: Vzdolžni prerez odseka mestna Ljubljance (Hec-Ras)

- višinske razlike na odseku mestne Ljubljance, med gladinami pretokov med povratnima dobama 100 in 10 let je 2,21 m, med 1000 in pa 100 let pa 0,31 m. Višinske razlike gladine ostanejo približno enake vse do zapornice, nato se nižajo do 50 cm za pretoke povratnih dob 100 in 1000 let,
- obsežnejše prelivanje brežin se začne pri pretokih s povratno dobo 100 in 1000 let,
- povprečna globina vodnega toka je 4,3 m.



Slika 40: Vzdolžni prerez odseka Gruberjev pretok (Hec-Ras)

- višinske razlike med gladinami pretokov na odseku Gruberjev prekop, med povratnima dobama 100 in 10 let je 1,69 m, med 1000 in pa 100 let pa 0,21 m. Tudi tukaj ostanejo višinske razlike gladine približno enake vse do zapornice. Nato se zmanjšajo za pretoke 1000 letne in 100 letne povratne dobe do višinske razlike gladine okoli 50 cm,
- na tem odseku se začne obsežnejše prelivanje brežin pri pretokih z 50 letno povratno dobo,
- povprečna globina vode je 4 m.

### 7.7.2 Pretočne hitrosti in strižne napetosti na odseku mestne Ljubljane

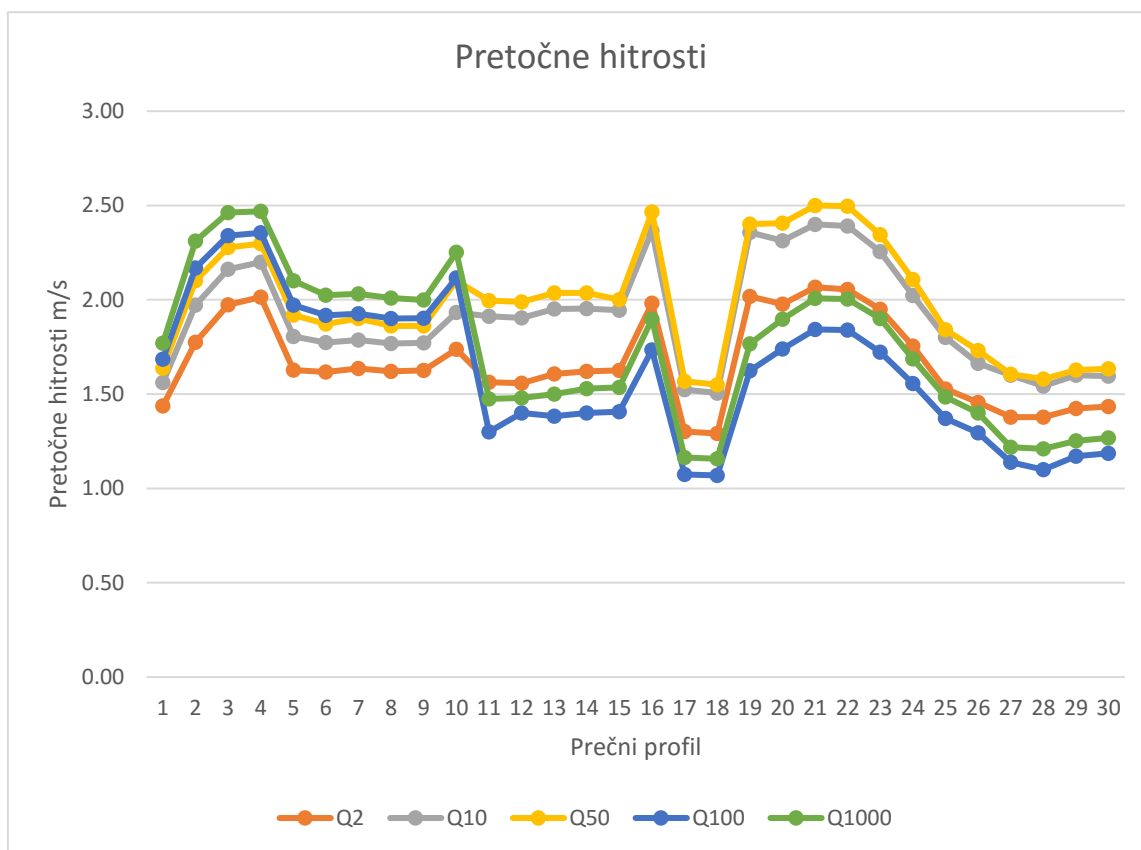


Diagram 7: Diagram pretočnih hitrosti na odseku mestne Ljubljane pri povratnih dobah 2, 10, 50, 100, 500, 1000 let (Hec-Ras)

Pretočne hitrosti so pri različnih povratnih dobah razlikujejo, kot vidimo na Diagramu 7:

- pri povratni dobi 2 leti je minimalna pretočna hitrost 1,07 m/s in maksimalna 2,07 m/s,
- pri povratni dobi 10 let je maksimalna pretočna hitrost 1,54 m/s in maksimalna 2,41 m/s,
- pri povratni dobi 50 let je maksimalna pretočna hitrost 1,55 m/s in maksimalna 2,51 m/s,
- pri povratni dobi 100 let je maksimalna pretočna hitrost 1,07 m/s in maksimalna 2,35/s,
- pri povratni dobi 1000 let je maksimalna pretočna hitrost 1,16 in maksimalna 2,47m/s.

Pretočne hitrosti enakomerno rastejo do Čevljarskega mosta. Pred mostom se zmanjšajo, ko pa ga reka preteče, se povečajo, saj morajo preteči manjši prečni presek struge, kot gorvodno mostu. Dolvodno mostu se do Tromostovja prečne hitrosti zmanjšajo, nakar se po prestopu mostu zopet povečajo. Pri

pretokih s povratno dobo 2, 10 in 50 let se po vodni oviri prečne hitrosti umirijo. Ko pridejo do zapornice na Ambroževem trgu, se pretoki spustijo skozi zapornice z malo povešano hitrostjo. Pretoki s povratno dobo 100 in 1000 let pa se močno znižajo, saj se pretok vode zadene v konstrukcijo zapornice, dolvodno zapornice pa zopet narastejo.

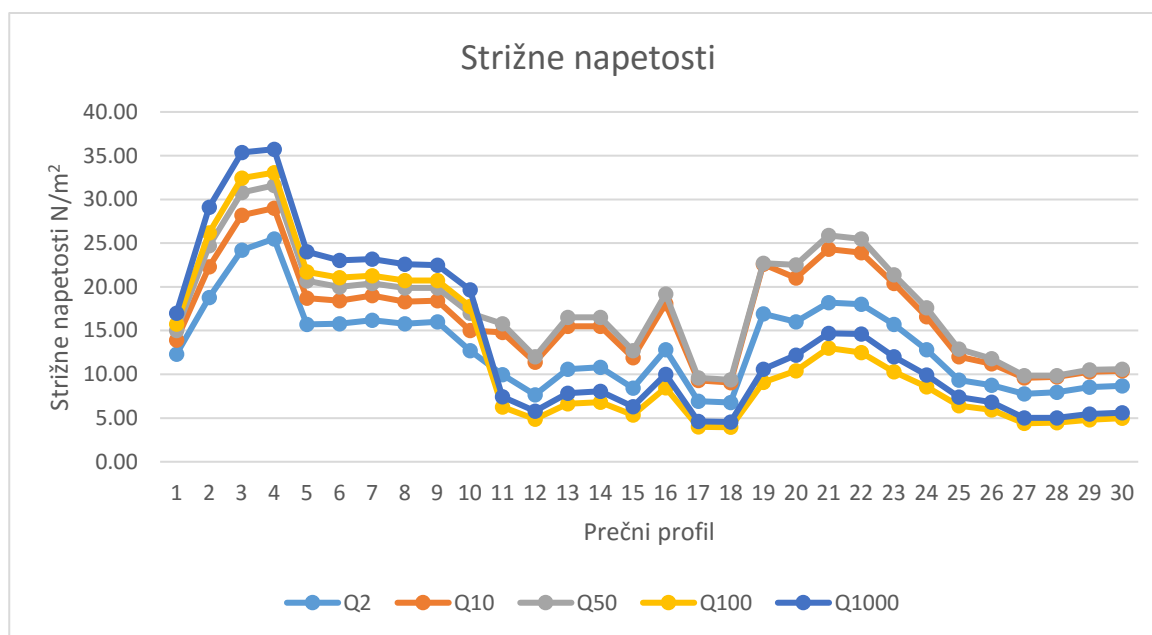


Diagram 8: Diagram strižnih napetosti na odseku mestne Ljubljane pri povratnih dobah 2, 10, 50, 100, 500, 1000 let (Hec-Ras)

Diagram strižnih napetosti sledi diagramu pretočnih hitrosti, saj so strižne napetosti odvisne od omočenega oboda struge in pa pretoka.

Strižne napetosti so napram napetostim v Gruberjevemu prekoku nizke. Ker je struga betonska ima dobro odpornost na hidravlične obremenitve.

### 7.7.3 Pretočne hitrosti in strižne napetosti na odseku Gruberjevega prekopa

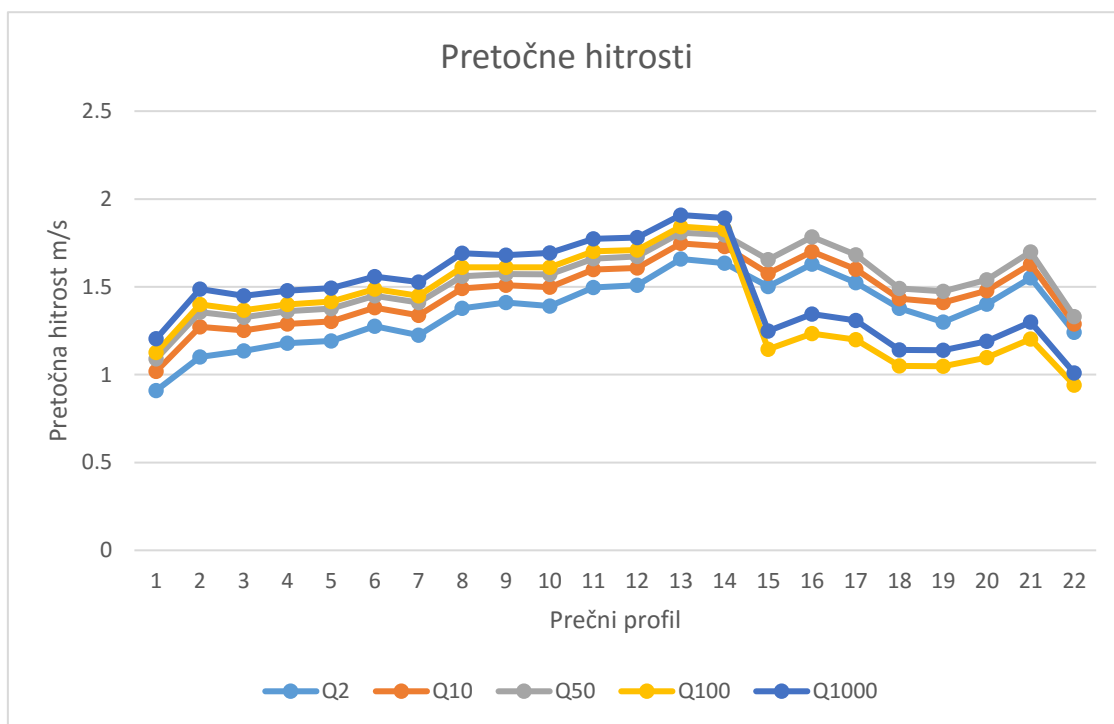


Diagram 9: Diagram pretočnih hitrosti na odseku Gruberjevega pretoka pri povratnih dobah 2, 10, 50, 100, 500, 1000 let (Hec-Ras)

Kot vidimo na Diagramu 9 imamo pri različnih povratnih dobah različne pretočne hitrosti. Pretoki so pri različnih povratnih dobah enaki po odstopanju.

- pri povratni dobi 2 let je maksimalna pretočna hitrost 0,91 m/s in maksimalna 1,66 m/s,
- pri povratni dobi 10 let je maksimalna pretočna hitrost 1,02 m/s in maksimalna 1,75 m/s,
- pri povratni dobi 50 let je maksimalna pretočna hitrost 1,71 m/s in maksimalna 2,81 m/s,
- pri povratni dobi 100 let je maksimalna pretočna hitrost 1,09 m/s in maksimalna 1,81 m/s,
- pri povratni dobi 1000 let je maksimalna pretočna hitrost 1,01 in maksimalna 1,91 m/s.

Razlika je le pri 500 letni in pa 1000 letni povratni dobi, kjer pretok prestopi zapornico na Gruberjevem pretoku pri prečnem preseku 15.

Ko pride tok vode do mosta na prečnem prerezu 15, se hitrost pretoka zmanjša, po prehodu pa sledi povečanje hitrosti vodnega toka, saj mora skozi manjši presek struge preteči ista količina vode. Tako se

pretočna hitrost konstanto zvišuje do konca prekopa. Tukaj nastopi vegetacija kot ovira rečnemu pretoku. Zato se mora pretočna hitrost povečevati.

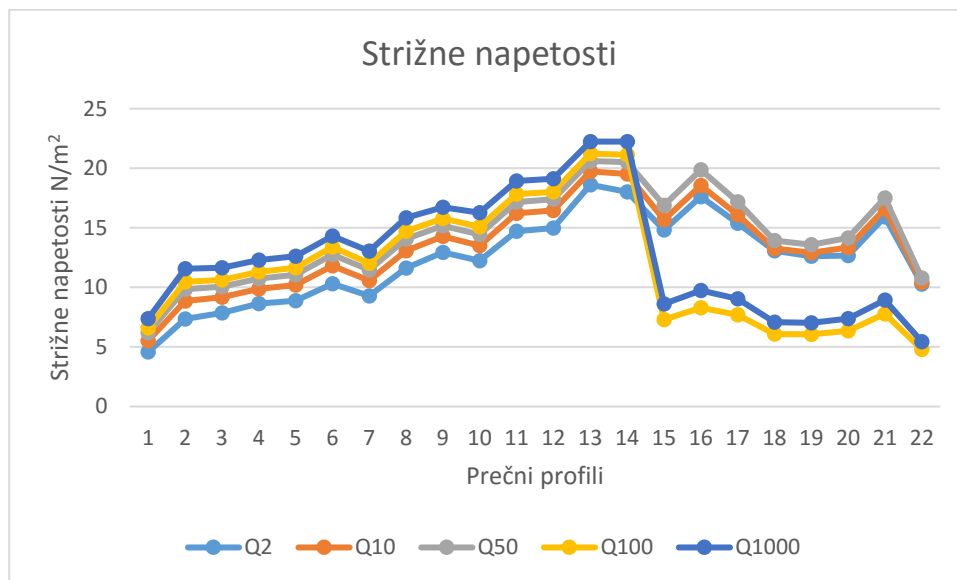


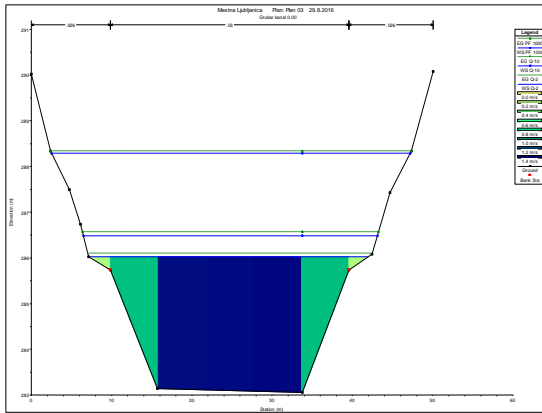
Diagram 10: Diagram strižnih napetosti na odseku Gruberjevega prekopa pri povratnih dobah 2, 10, 50, 100, 500, 1000 let (Hec-Ras)

Strižne napetosti v Gruberjevem prekoku so visoke skoraj tako kot v mestni Ljubljani, s tem da teče po odseku mestne Ljubljane  $2/3$  celotnega pretoka, po Gruberjevem prekoku pa  $1/3$ . Ker struga ni pravih oblik prihaja do velikih hidravličnih omejitev. Vse skupaj poslabša vegetacija, ki je zelo obsežno razraščena.

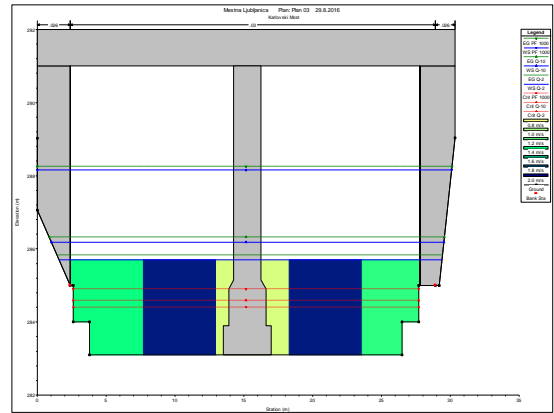
Pretoka pri povratni dobi Q100 in Q1000 na prečnem prerezu 15 upadeta in sicer ju ovira vrh konstrukcije zapornice. Dolvodno zapornice, pa se vrednosti zopet povečajo.



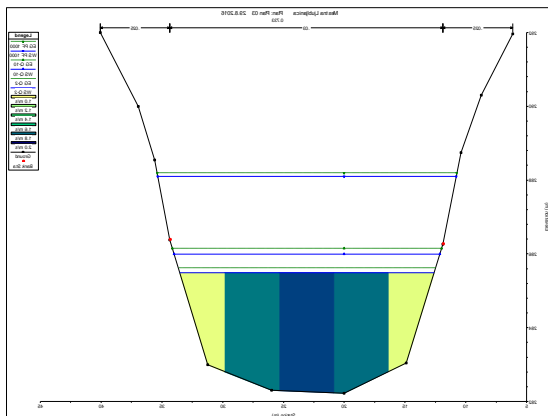
### 7.7.4 Pretočne hitrosti in njihova razporeditev po odseku Gruberjev prekop



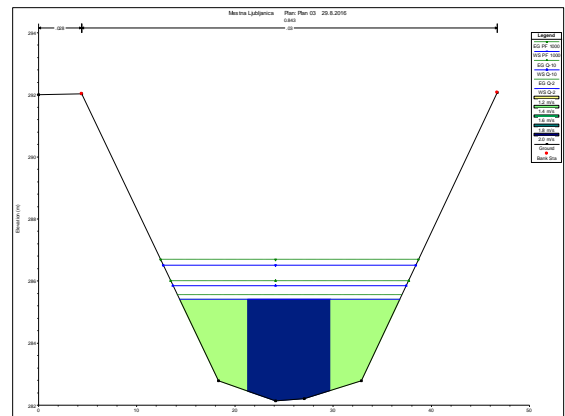
Slika 41: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 20 pred Karlovškim mostom (Hec-Ras)



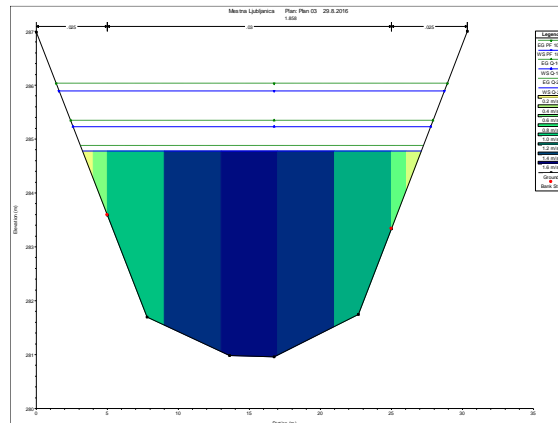
Slika 42: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 17 pri Karlovškem mostu (Hec-Ras)



Slika 43: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 16 med zapornicami in Karlovškim mostom (Hec-Ras)



Slika 44: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 14 pred zapornico (Hec-Ras)



Slika 45: Razporeditev pretočnih hitrosti pri prečnem profilu 8 (Hec-Ras)

Kot vidimo po slikah, so pretočne hitrosti po Gruberjevem pretoku večje tam kjer ni gradbenih struktur. Večje pretočne hitrosti so predvsem posledica večjega padca v Gruberjevem kanalu.

Manjše pretočne hitrosti nastanejo ob rečnih bregovih, v mostni odprtini, pa se ob mostnem oporniku te hitrosti še bolj znižajo.

Pri Karlovškem mostu so ob bregu pretočne hitrosti vrednosti 1,3 m/s. Na sredini svetle odprtine mostu so pretočne hitrosti 1,94 m/s. Ob mostnem oporniku pa so pretočne hitrosti najnižje, in sicer merijo 0,89 m/s.

### 7.7.5 Primerjava rezultatov

Po Gruberjevem prekoku smo spustili 1/3 celotnega pretoka in po mestni Ljubljanci 2/3 celotnega pretoka. Navkljub taki porazdelitvi pretoka, so v Gruberjevem prekoku le malo manjše pretočne hitrosti. Te hitrosti povečujejo hidravlične obremenitve, ki se kažejo kot poškodbe obrežnih zavarovanj in kot erozijske zajede na brežinah. Rečna struga mestne Ljubljance pa je urejena z betonskimi obrežnimi zidovi. Tukaj je manjši Manningov koeficient, manjše pretočne hitrosti v razmerju z pretokom in posledično manjše hidravlične obremenitve.

Oba odseka imata poleg zaporničnih objektov tudi številne premostitve. V obeh primerih je postopek pretoka skozi mostno odprtino enak. Voda gorvodno mostu se zajezi, zato mora dolvodno mostu pospešiti. Tukaj nastanejo energijske izgube.

Vode s povratno dobo 100 in 1000 let v obeh primerih prestopita oziroma dosežeta vrh prečne zapornične konstrukcije. Hidravlično dogajanje v tem primeru bi bilo zelo kompleksno in brez dodatnih terenskih podatkov o hidravličnih razmerah v strugi, so rezultati hidravličnega izračuna zelo vprašljivi. Hidravlični izračun namreč v tem primeru predpostavi, da pride do velike zaježitve. Voda mora dolvodno na ta račun močno pospešiti.

Najvišje strižne napetosti so na odseku Gruberjevega prekopa malo nižje kot na odseku mestne Ljubljane. Četudi je pretok na tem odseku nižji, pa gre velik del višjih vrednosti strižnih napetosti pripisati vegetaciji, ki omejuje rečni pretok.

## 8 ZAKLJUČEK

Pri diplomski nalogi sem obravnaval reko Ljubljano in sicer od Barja do Most s poudarkom na odseku mestne Ljubljane in Gruberjevega prekopa.

V prvem delu sem predstavil vpliv vegetacije na tok vode, hidravliko mostnih odprtih in vpliv mostnih opornikov, ki nudijo upor pretoku vode in pa samo Ljubljano kot obravnavan odsek.

V drugem delu sem uporabil program HEC-RAS za analizo hidravličnih razmer na odseku mestne Ljubljane in Gruberjevega prekopa. S programom smo dobili rezultate o pretočnih hitrostih in strižnih napetostih iz katerih sem interpretiral rezultate.

Vodi smo v zadnjih 200 letih odvzeli veliko prostora. Zožili smo struge, povečali zarast, in postavili številne ovire. Tako smo zmanjšali poplavno varnost.

Za izboljšanje poplavnih razmer bo v prihodnosti ključna pravilna in verodostojna hidravlična obravnava rečnih strug v različnih hidroloških pogojih, pravilno hidravlično načrtovanje spremljajoče infrastrukture in hidrotehničnih objektov in nenazadnje izbira pravih konstrukcijskih materialov. Prav tako je pomembna pravilna izbira vegetacije, ki jo nasadimo na bregovih, saj nekatere rastline nudijo velik upor rečnemu toku in ga tako upočasnijo. Prava izbira rastlin pa je pomembna tudi za utrditvijo rečnih bregov in varovanje njih pred erozijo.

Pravo dimenzioniranje je potrebno tudi pri drugih posegih v prostor kot so gradbene konstrukcije. To so mostovi, prelivi, jezovi, zapornice,... Zagotoviti moramo varnost pred poplavami, poskrbeti moramo za čim manjši poseg v prostor, za pravilno izbiro mostnih stebrov, da nudijo čim manjši upor rečnemu toku in tako zmanjšamo vlogo pri poplavih.

Ogromen poudarek je potrebo dajati na vodo, z njo spoznati neozaveščene, misliti dolgoročno in racionalno, saj kakor je voda rušilno telo, je tudi vir življenja.

## 9 VIRI

Allmendinger, N., Pizzuto, J., Potter, N., Johnson, T., Hession, W. 2005. The influence of riparian vegetation on stream width, Eastern Pennsylvania, USA.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.605.7534&rep=rep1&type=pdf> (pridobljeno 7.8.2015)

Benedičič, U. 2011. Poplavna varnost Ljubljane in poplave septembra 2010. Ljubljana. Diplomaska naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba U. Benedičič): 64 str.

Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme – varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije: univerzitetni učbenik. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Broad crested weir 2016. [http://www.jfccivilengineer.com/broad\\_crested\\_weir.htm](http://www.jfccivilengineer.com/broad_crested_weir.htm) (Pridobljeno 20.5.2016)

Brunner, G. 2010. Hec-ras, river analysis system hydraulic reference manual. Us army corps of engineers. Hydrologic engineering center: 411 str.

DIREKTIVA 2007/60/ES EVROPSKEGA PARLAMENTA IN SVETA z dne 23. oktobra 2007 o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti, Uradni list Evropske unije. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SL/TXT/?uri=CELEX%3A32007L0060> (pridobljeno 2.3.2016)

El-Alfy, K. 2016. Experimental study of backwater rise due to bridge piers as flow obstructions, [http://www.iwtc.info/2006\\_pdf/05-1.pdf](http://www.iwtc.info/2006_pdf/05-1.pdf) (Pridobljeno 14.5.2016)

Galema, A. 2009. Vegetation resistance (evaluation of vegetation resistance descriptors for flood management). University of Twente: 114 str.

Gerten, D., Schaphoff, S., Haberlandt, U., Lucht, W., Sitch, S. 2003. Terrestrial vegetation and water balance – hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. Journal of hydrology: 22 str.

Globevnik, L., Vidmar, A. 2010. Poplave na ljubljanskem barju v septembru 2010. <http://mvd20.com/LETO2010/R4.pdf> (Pridobljeno 3.2. 2016)

Hamill, L. 1998. Bridge hydraulics. University of Plymouth. School of civil and structural engineering: 384 str.

- Hrast, V. 2007. Ureditev plovbe po Ljubljani. Diplomski naloga. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba V. Hrast): 65 str.
- Hydraulic design of safe bridges 2015.  
<http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif12018.pdf> (Pridobljeno 15.7.2015)
- Kolenc, M., 2014. Več prostora za vode. Seminarska naloga. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba M. Kolenc): 54. str
- Mikoš, M. 2008. Osnove hidroustvarjanja. Ljubljana. [ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/students/vodne\\_zgradbe/Vodne\\_zgradbe\\_2008.pdf](ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/students/vodne_zgradbe/Vodne_zgradbe_2008.pdf) (Pridobljeno 15.4.2016)
- Muller, M., Steinman, F., Rak, G. 2009. Vpliv redčenja zarasti na obseg poplavne nevarnosti  
<http://mvd20.com/LETO2009/R11.pdf> (Pridobljeno 3.2.2016)
- Natek, K. 2011. Mali vodni tokovi in njihovo poplavno ogrožanje Ljubljane. Univerza v Ljubljani. Filozofska fakulteta: 119 str.
- Na ljubljanski Špici odprtje novih pristanov v Gruberjevem kanalu. 2016. <http://www.zurnal24.si/na-ljubljanski-spici-odprtje-novih-pristanov-v-gruberjevem-kanalu-clanek-254260> (Pridobljeno 14.5.2016)  
<http://www.zurnal24.si/na-ljubljanski-spici-odprtje-novih-pristanov-v-gruberjevem-kanalu-clanek-254260> (Pridobljeno 8.4.2016)
- Pregled ukrepov za povečanje poplavne varnosti v MOL 2016. [file:///C:/Users/znj/Downloads/5.-toka--poplavna-varnost-mol%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/znj/Downloads/5.-toka--poplavna-varnost-mol%20(2).pdf) (Pridobljeno 14.5.2016)
- Richardson, D., Holmes, P., Elser, K., Galatowisch, S., Stromberg, J., Kirkman, S., Pyšek, P., Hobbs, R. 2007. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects.  
[http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1366516.2006.00314.x/epdf?r3\\_referer=wol&tracking\\_action=preview\\_click&show\\_checkout=1&purchase\\_referrer=www.google.si&purchase\\_site\\_license=LICENSE\\_DENIED\\_NO\\_CUSTOMER](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1366516.2006.00314.x/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=www.google.si&purchase_site_license=LICENSE_DENIED_NO_CUSTOMER) (Pridobljeno 15.2.2015)
- Republika Slovenija, Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, Agencija republike Slovenije za okolje 2013. Povratne dobe velikih in malih pretokov za merilna mesta državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda: 33 str.
- Steinman, F. 1999. Hidravlika. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 281 str.
- Vilhar, S. 2014. Možnosti izkoriščanja vodnega potenciala na jezu na Gruberjevem prekoku. Diplomski naloga. Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba S. Vilhar): 72 str.

Wu, F., Shen, H., Chou, Y. 2015. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation <http://www.bse.ntu.edu.tw/wfc/pdf/A-02.pdf> (Pridobljeno 5.3.2015)

Yarnell, D. 1936. Bridge piers as channel obstructions. United states department of agriculture. Washington, D.C.: 65 str.

Žura, N. 2014. Poplave in premostitveni objekt. Diplomski naloga, Ljubljana. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Samozaložba N. Žura): 44 str.

89 Uradni list RS, št. 89/2008, z dne 19. 9. 2008. 2015. <https://www.uradni-list.si/1/content?id=88381#!/Uredba-o-pogojih-in-omejitvah-za-izvajanje-dejavnosti-in-posegov-v-prostor-na-obmocjih-ogrozenih-zaradi-poplav-in-z-njimi-povezane-erozije-celinskih-voda-in-morja> (Pridobljeno 5.7.2015)